



HAL
open science

Outil de simulation de propagation des creux de tension dans les réseaux industriels

Isabelle El Baaklini

► **To cite this version:**

Isabelle El Baaklini. Outil de simulation de propagation des creux de tension dans les réseaux industriels. Sciences de l'ingénieur [physics]. Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 2001. Français. NNT: . tel-00549736

HAL Id: tel-00549736

<https://theses.hal.science/tel-00549736>

Submitted on 22 Dec 2010

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

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

THESE

pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE
(Arrêté ministériel du 30 mars 1992)

Spécialité : « Génie Electrique »

préparée au Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble

dans le cadre de l'Ecole Doctorale « *Electronique, Electrotechnique, Automatique,
Télécommunication et Signal* »

présentée et soutenue publiquement

par

Isabelle EL BAAKLINI

le 23/03/2001

**OUTIL DE SIMULATION DE PROPAGATION DES CREUX
DE TENSION DANS LES RESEAUX INDUSTRIELS**

Directeurs de thèse : RETIERE Nicolas et BACHA Seddik

JURY

M. Daniel ROYE
M. Shahrokh SAADATE
M. Mohamed El Hadi ZAÏM
M. Christophe GAUDIN
M. Nicolas RETIERE
M. Seddik BACHA

Président
Rapporteur
Rapporteur
Examineur
Examineur
Examineur

Remerciements

Au début de ce mémoire je tiens à remercier toutes les personnes qui m'ont permis de mener à bien ce travail de thèse :

En particulier,

Monsieur ROYE Daniel, Professeur à l'Institut National Polytechnique de Grenoble,

pour avoir présidé le jury de thèse, pour sa grande gentillesse et ses conseils pendant le déroulement de la thèse.

Messieurs

SAADATE Shahrokh, Professeur, Université Henry Poincaré de Nancy et

ZAIËM Mohammed El Hadi, Maître de conférences, Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes,

je les remercie de l'intérêt qu'ils ont accordé au travail de thèse en acceptant d'être présents dans le jury en tant que rapporteurs.

Monsieur RETIERE Nicolas, Maître de conférences à l'IUFM de Grenoble

qui m'a accordé sa confiance en acceptant de diriger le travail de thèse. Je le remercie également pour son dévouement et son sérieux afin de mener au mieux le travail de thèse.

Monsieur BACHA Seddik, Professeur de l' Université Joseph Fourier/ IUTI, Grenoble

je le remercie pour avoir accepté de diriger le travail de thèse pendant les trois ans, sa bonne humeur et son soutien.

Monsieur GAUDIN Christophe, Ingénieur de Recherche, EDF R&D

Je le remercie particulièrement pour m'avoir accordé sa confiance en me permettant de mener ce travail de thèse, ainsi que pour sa disponibilité, ses conseils techniques et sa contribution à m'offrir les meilleurs conditions de travail.

Monsieur PLANTIVE Eric, Chef du groupe Qualité et Conditionnement de l'Energie à EDF R&D

je suis très reconnaissante de son support depuis mon stage de DEA. Je le remercie pour l'intérêt qu'il a montré à l'égard de mon travail ainsi que pour son soutien et de sa grande amabilité.

Monsieur DESSOUDE Maxime, Ingénieur de Recherche, EDF R&D

je suis très reconnaissante de l'intérêt qu'il m'a accordé. Ses compétences et sa grande expérience ont été indispensables pour l'orientation du travail de thèse.

Monsieur NGUEFEU Samuel, Ingénieur de Recherche EDF R&D

je le remercie pour m'avoir permis de partager son bureau à EDF, ainsi que pour sa grande gentillesse, ses conseils techniques et sa patience à m'écouter avec attention.

Madame MICHALAK Pascale, Ingénieur de Recherche, EDF R&D

je tiens à la remercier tout particulièrement pour la confiance et le soutien qu'elle m'a offerts tout au long de ma formation.

Monsieur POULIQUEN Hervé, Chef de Groupe, EDF R&D

je le remercie pour m'avoir fait confiance en m'encourageant à mener cette thèse qu'il a initiée.

Monsieur GORGETTE Frédéric, Ingénieur de Recherche, EDF R&D

je le remercie pour son grand sérieux et ses conseils très pertinents. J'ai beaucoup apprécié le travail avec lui pendant les derniers mois de ma thèse.

Madame GAUDIN Sylvie, Secrétaire, EDF R&D

j'apprécie tout particulièrement sa présence, sa serviabilité ainsi que son humour.

Monsieur JONCQUEL Eric, Ingénieur de Recherche, EDF R&D

je le remercie de son attention, ses remarques intéressantes et son bon café sur rendez-vous.

Un merci à toute l'équipe du LEG pour leur sympathie, disponibilité et serviabilité.

Et finalement j'exprime une particulière reconnaissance à toutes les personnes du service ERMEL à EDF Clamart.

Sommaire

INTRODUCTION.....	8
CHAPITRE 0: CONTEXTE DE L'ETUDE.....	10
PROBLEMATIQUE :	11
Contrat Emeraude :	11
Structure du réseau moderne.....	12
CONCLUSION	12
CHAPITRE 1 : INTRODUCTION SUR LA QUALITE DE L'ENERGIE ET SUR LES PERTURBATIONS.....	14
LA QUALITE DE L'ENERGIE	16
LES PERTURBATIONS	16
Les perturbations transitoires : exemple de la foudre [7]-[17].....	17
Les perturbations longues ou permanentes	17
Les perturbations brèves	20
Les creux et coupures brèves [1]-[2]-[6].....	21
LES CONTRAINTES DES RESEAUX DE DISTRIBUTION FACE AUX CREUX DE TENSION	22
Les charges sensibles [10]	23
Le contexte concurrentiel [2].....	24
Les contraintes structurelles.....	24
DEFINITIONS DES CREUX DE TENSION ET DE COUPURES BREVES [2].....	25
Creux de tension :	25
Coupures brèves :	25
ORIGINES ET NATURES DES CREUX DE TENSION ET COUPURES BREVES [1]	25
Les creux de tension et des coupures brèves sur le réseau du distributeur	25
Les creux de tension et coupures brèves liés à des phénomènes qui se produisent chez le client	28
IMPACT DES CREUX DE TENSION ET DES COUPURES BREVES SUR LES EQUIPEMENTS INDUSTRIELS [1]-[2].....	28
Généralités	28
Effets des creux de tension sur les machines à induction	29
Effets des creux de tension sur les autres éléments habituels d'une installation industrielle [1]	31
SOLUTIONS FACE AUX CREUX DE TENSION ET AUX COUPURES [1]	32
Solutions de désensibilisations face aux creux et aux coupures provenant du réseau du distributeur :	32
Solutions de désensibilisations face aux creux et aux coupures générés par l'installation d'un client :.....	33
ANALYSE STATISTIQUE DES CREUX DE TENSION DANS UNE ENTREPRISE INDUSTRIELLE [8].....	34
INTERETS D'ELABORER UN OUTIL INFORMATIQUE POUR L'ETUDE DES CREUX DE TENSION	37
Pourquoi un logiciel ?	37

Quel logiciel ?.....	37
Entrées/Sorties du logiciel	38
Quel futur pour le logiciel ?.....	39
CONCLUSION	39
CHAPITRE 2 : PROPAGATION DES CREUX DE TENSION DANS UN RESEAU	
INDUSTRIEL.....	41
1 INTRODUCTION.....	42
2 SCHEMA DE BASE DE L'INSTALLATION	42
2.1 Les tensions aux nœuds	43
2.2 Les lignes.....	43
2.3 Les transformateurs de tension	43
2.4 Les charges.....	44
3 MISE EN EQUATION.....	45
3.1 Equation récurrente entre deux tensions consécutives	45
3.2 Conditions de fonctionnement pour que V_{H+1} existe.....	46
3.3 Interprétation de l'équation [1].....	47
4 SIMPLIFICATION DE L'EQUATION RECURRENTE	48
4.1 Hypothèse sur la chute de tension et conséquences	48
4.2 Formule de récurrence.....	50
4.3 Conclusion.....	51
5 ALGORITHME DE CALCUL DU PLAN DE TENSION	52
5.1 Entrées de l'algorithme.....	52
5.2 Principe de l'algorithme.....	53
5.3 Cas particulier du démarrage de machines à induction.....	55
5.4 Organigramme de l'algorithme de calcul.....	55
6 VALIDATION DES RESULTATS SUR SABER.....	56
6.1 Première installation.....	57
6.2 Deuxième installation.....	58
6.3 Troisième installation	59
6.4 Quatrième installation	60
7 SYNTHESE ET CONCLUSION	60
CHAPITRE 3 : MODELISATION DE LA MACHINE A INDUCTION	
61	
1 INTRODUCTION.....	62
2 ESTIMATION DES PARAMETRES DE LA MACHINE A INDUCTION	63
2.1 Principe	63
2.2 Calcul des paramètres.....	63
2.3 Exemple d'application numérique	67

CHAPITRE 5 : MODELISATION DE L'ENSEMBLE RESEAU-CHARGE ET

VALIDATIONS	133
1 INTRODUCTION	134
2 ARCHITECTURE GENERALE DU RESEAU:	134
2.1 Eléments du réseau	135
3 PRINCIPE DE L'ALGORITHME DE SIMULATION	137
3.1 Hypothèses	137
3.2 Algorithme du calcul de la propagation de la tension	137
4 INTRODUCTION AU PROGRAMME DE SIMULATION	140
4.1 Sémantique de l'indexation	140
4.2 Interface : Fichiers texte	141
4.3 Validation des résultats	142
5 RESULTATS DE SIMULATION	146
5.1 A l'apparition et au rétablissement de la tension.....	146
5.2 Etude du démarrage instantané de plusieurs moteurs	162
6 CONCLUSION	169
CONCLUSION GENERALE	170
ANNEXE 1 : TRANSFORMATION DES GRANDEURS TRIPHASES DANS LE REPERE DE PARK.....	173
ANNEXE 2 : MODELISATION DU TROISIEME ORDRE DE LA MACHINE A INDUCTION	179
ANNEXE 3 : MODELISATION DU PREMIER ORDRE DE LA MACHINE A INDUCTION	181
ANNEXE 4 : MODELISATION DU SECOND ORDRE DE LA MACHINE A INDUCTION	184
ANNEXE 5 : ETUDE DES GRANDEURS TRIPHASEE DANS LE CAS DESEQUILIBRE	188
ANNEXE 6 : EXEMPLE DE FICHIERS TEXTE.....	191
REFERENCES	197

3	MODELISATION STATIQUE DE LA MACHINE A INDUCTION.....	68
3.1	Modélisation statique sans effet de peau.....	68
3.2	Modélisation statique de la machine à induction avec effet de peau	69
4	MODELISATION DYNAMIQUE DE LA MACHINE A INDUCTION EN REGIME EQUILIBRE	76
4.1	Modèle du cinquième ordre.....	77
4.2	Modèle du troisième ordre.....	78
4.3	Modèle du second ordre	79
4.4	Modèle du premier ordre.....	79
5	MODELISATION DYNAMIQUE DE LA MACHINE A INDUCTION EN REGIME DESEQUILIBRE.....	80
5.1	Composition du système triphasé dans le repère de Park.....	80
5.2	Calcul des puissances :.....	86
6	MODELISATION DE LA MACHINE A INDUCTION DANS LE CAS DE COUPURES DUES A UNE OUVERTURE DES PROTECTIONS (ISTATOR=0)	87
6.1	Mise en équation.....	87
6.2	Application numérique.....	89
7	CONCLUSION	91
 CHAPITRE 4 : EXPLOITATION ET ANALYSE DES MODELES DE LA MACHINE A INDUCTION		 93
1	INTRODUCTION.....	94
2	LES TRANSITOIRES ELECTRIQUES ET MECANIQUES.....	95
2.1	Transitoires électriques.....	95
2.2	Transitoire mécanique.....	97
3	EXPLOITATION DU MODELE STATIQUE POUR LE CALCUL DE LA TENSION DE DECROCHAGE	98
4	INFLUENCE DE L'EFFET DE PEAU SUR UN CREUX DE TENSION	99
4.1	Tension de décrochage.....	99
4.2	Variation de la résistance rotorique.....	108
4.3	Influence de l'effet de peau sur l'allure du couple pendant un creux de tension	111
4.4	Conclusion.....	115
5	COMPARAISON DES DIFFERENTS ORDRES DE MODELISATION	115
5.1	Au démarrage	115
5.2	Creux de tension de profondeur 40% (U=260V, f=50Hz)	120
5.3	Au décrochage.....	122
5.4	Au rétablissement de la tension.....	127
6	COMPARAISONS DES EFFET DES CREUX EQUILIBRES ET DESEQUILIBRES SUR LES MACHINES A INDUCTION	129
7	SYNTHESE	133
8	CONCLUSION	133

Introduction

Le développement des usages de l'électricité dans l'industrie induit des exigences dans la qualité de l'énergie à fournir. La qualité de l'énergie fournie aux utilisateurs dépend de celle de la tension au point de livraison. Elle peut être affectée par certains incidents, soit externes comme la défaillance de la source d'alimentation ou bien inhérents à l'installation. Ces défauts détériorant la qualité de la tension se manifestent sous formes de différentes perturbations : surtension, déséquilibre, fluctuation, harmonique et creux de tension.

A cet effet à travers le contrat Emeraude : *“EDF garantit un niveau de qualité de l'alimentation. Elle s'engage sur des critères précis comme la limitation du nombre d'interruptions longues ou brèves de l'alimentation. En cas de non respect de ces critères l'entreprise indemnise le client en fonction des préjudices subis. Le client veille à ce que ses installations ne provoquent pas de perturbations sur le réseau”*.

Parmi ces différents types de perturbations, les creux de tension, induisent des dysfonctionnements importants au sein des installations industrielles. Ils se caractérisent par leur amplitude (40 à 80 % des creux de tension ont des amplitudes comprises entre 10 et 20%) et leur durée (70 à 90 % des creux de tension ont des durées comprises entre 20 et 350ms). Ils sont soit d'origines internes soit d'origines externes à l'installation.

Plusieurs campagnes de mesures ont été effectuées pour fournir des informations concernant ces perturbations, plus particulièrement, l'amplitude et la durée des creux de tension et coupures brèves, qui feront l'objet de notre étude. Néanmoins lorsqu'il est souhaitable d'établir des préventions des phénomènes constatés, il est utile de pouvoir reconstruire les formes d'onde des coupures brèves et des creux de tension enregistrés. C'est pourquoi, il a été envisagé d'élaborer un outil de pré – diagnostic de ces phénomènes perturbateurs.

Notre étude consiste à élaborer un outil de pré – diagnostic pour l'étude de la propagation et des effets des creux de tension et coupures brèves dans les réseaux industriels . Ces derniers sont relativement très sensibles à ce type de perturbations du fait des différentes charges qui s'y trouvent. En effet les moteurs asynchrones constituent la principale charge des réseaux industriels, ils sont parmi les charges les plus affectées par la présence de creux de tension et leurs défaillances risquent non seulement de perturber le fonctionnement de l'installation, mais aussi, de causer des dégâts aux charges qu'ils entraînent.

Nous avons dans un premier temps axé notre travail sur la modélisation statique des lignes dans l'installation. Les charges aux différents nœuds sont représentées par leurs puissances active et réactive. Ensuite, en utilisant une approche itérative, un algorithme de répartition de charge sera mis à contribution pour le calcul des tensions aux différents nœuds du réseau.

Dans un deuxième temps, la modélisation de la machine asynchrone principale charge industrielle, sera examinée plus particulièrement. Mais plusieurs contraintes surgissent lors de cette modélisation, notamment le manque d'information concernant les caractéristiques de la machine. Les données catalogues sont la principale source d'information disponible à partir desquelles il faudrait estimer les paramètres de la machine. Plusieurs ordres de modèles dynamiques seront étudiés. Le démarrage des machines asynchrones, requiert également une modélisation de l'effet de peau basé sur une loi de variation de la résistance rotorique en fonction du glissement.

Le codage du logiciel est basé côté réseau sur un calcul de répartition de charge « load flow » permettant d'extraire l'évolution de la tension dans les différents nœuds de l'installation. Du côté charge, le codage est basé sur des modèles dynamiques. La tension issue du calcul de répartition de charge est appliquée à la charge pendant un pas de calcul ainsi les puissances actives et réactives de la charge sont déterminées et appliquées pour un nouveau calcul de répartition de charge. Les nouvelles valeurs de la tension sont calculées pour le prochain pas de calcul.

Dans le détail, le présent mémoire se répartit comme suit :

Le Chapitre 1 présente une introduction sur la qualité de l'énergie et les creux de tension en particulier. L'accent est mis sur l'intérêt d'élaborer un outil informatique dédié à notre problème.

Le Chapitre 2 présente une approche circuit statique pour le calcul de la propagation de la tension : La modélisation des lignes ainsi que l'algorithme de répartition de puissance.

Le Chapitre 3 traite le cas de la machine à induction : La détermination des paramètres à partir des données catalogue et la modélisation dynamique de la machine. L'effet de peau, dont l'effet au démarrage est notable, est pris en compte dans les modèles que cela soient statiques ou dynamiques. Pour finir un modèle de la machine asynchrone particularisé au cas de l'ouverture des protections est présenté. Il permet d'étudier l'évolution du glissement pendant l'ouverture ainsi que la tension résiduelle au stator.

Le Chapitre 4 présente une étude comparative entre les différents ordres de modèles dynamiques afin de choisir l'ordre le plus convenable à l'algorithme en termes de fiabilité et simplicité. Les divers modèles sont ainsi testés et comparés dans le cas de creux triphasés équilibrés et déséquilibrés.

Le Chapitre 5 récapitule l'ensemble des résultats sous la forme d'un algorithme général qui comprend les fichiers texte pour introduire les données, les modèles de lignes et les méthodes de calcul. Une comparaison en termes de précision mais aussi de rapidité est faite avec les mêmes modèles de réseau complet implantés sous Matlab/Simulink.

Chapitre 0: Contexte de l'étude

Problématique :

Cette étude s'insère dans un contexte général qui est celui de la Qualité de tension. En effet cette dernière, commence à prendre de l'ampleur dans le domaine industriel, du fait du coût et des pertes occasionnés par la dégradation de la tension. L'ouverture du marché de l'électricité pour les gros client et les soucis de concurrence poussent les fournisseurs et les industriels à investir dans le domaine de l'amélioration de la qualité de la tension. En effet, cette étude s'intègre dans le cadre des nouveaux services d'EDF autour de la qualité de l'énergie.

Traditionnellement la relation d'EDF avec le client s'appuie jusqu'à aujourd'hui sur le contrat Emeraude :

Contrat Emeraude :

1. EDF garantit un niveau de qualité de l'alimentation. Elle s'engage sur des critères précis comme la limitation du nombre d'interruptions longues ou brèves de l'alimentation. En cas de non respect de ces critères l'entreprise indemnise le client en fonction des préjudices subis. Le client veille à ce que ses installations ne provoquent pas de perturbations sur le réseau.
2. Programmation des interruptions (l'optimisation des dates, heures et durées est faite avec le client).
3. Information des clients (information systématique pour les coupures longues).
4. Mensualisation
5. Conseil tarifaire (optimisation)
6. Bilan annuel et mensuel (envoi du dossier complet sur la gestion du contrat pour l'année écoulée et à la demande, envoi de la courbe de charge mensuelle)
7. Information EJP (Effacement Jour de Pointe)
8. Applications de l'électricité (information et, à la demande, étude technico-économique d'un processus)
9. Formation technique (formation des clients pour l'exploitation de leurs postes Haute Tension).

Structure du réseau moderne

Le réseau de distribution

Le réseau de distribution est concerné en premier lieu par les deux thématiques, il est présenté dans la figure 1. Les niveaux de tension diffèrent d'un pays à l'autre, toutefois le dénominateur commun à la distribution est son raccordement à une source de puissance de court-circuit "infinie". Classiquement ce réseau voit un écoulement unidirectionnel de l'énergie (du réseau de transport vers les charges du réseau de distribution), la nouveauté est qu'à travers les nœuds de la distribution, des générateurs peuvent être connectés et fournir une énergie, rendant ainsi son écoulement bi-directionnel.

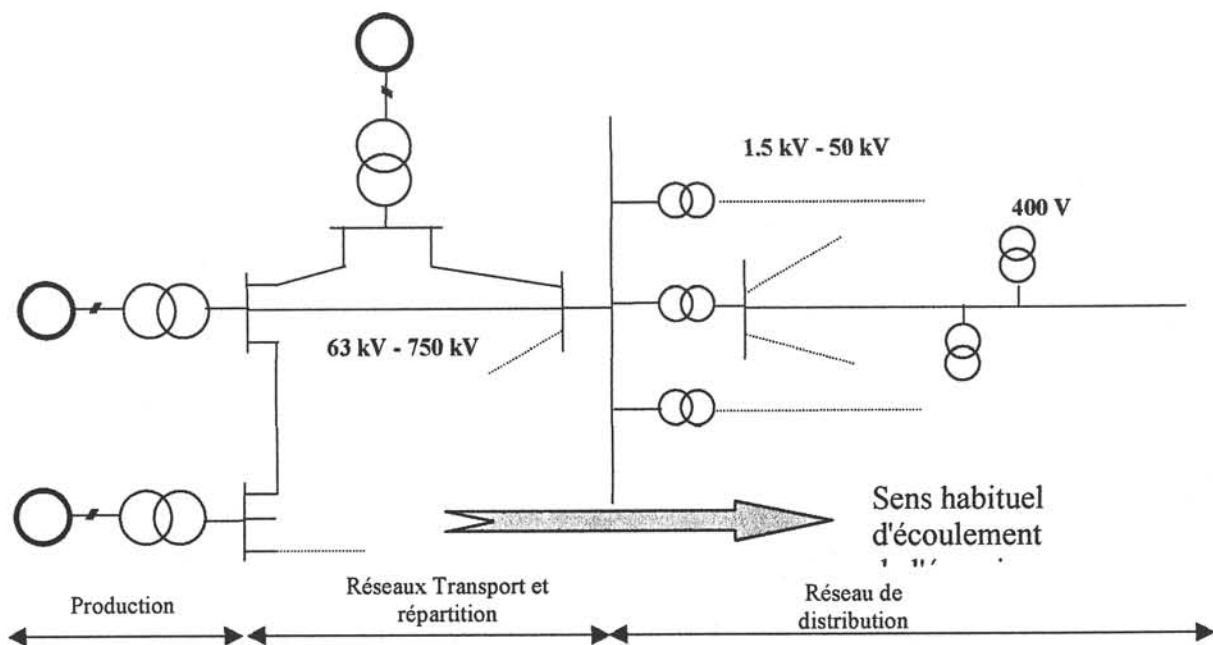
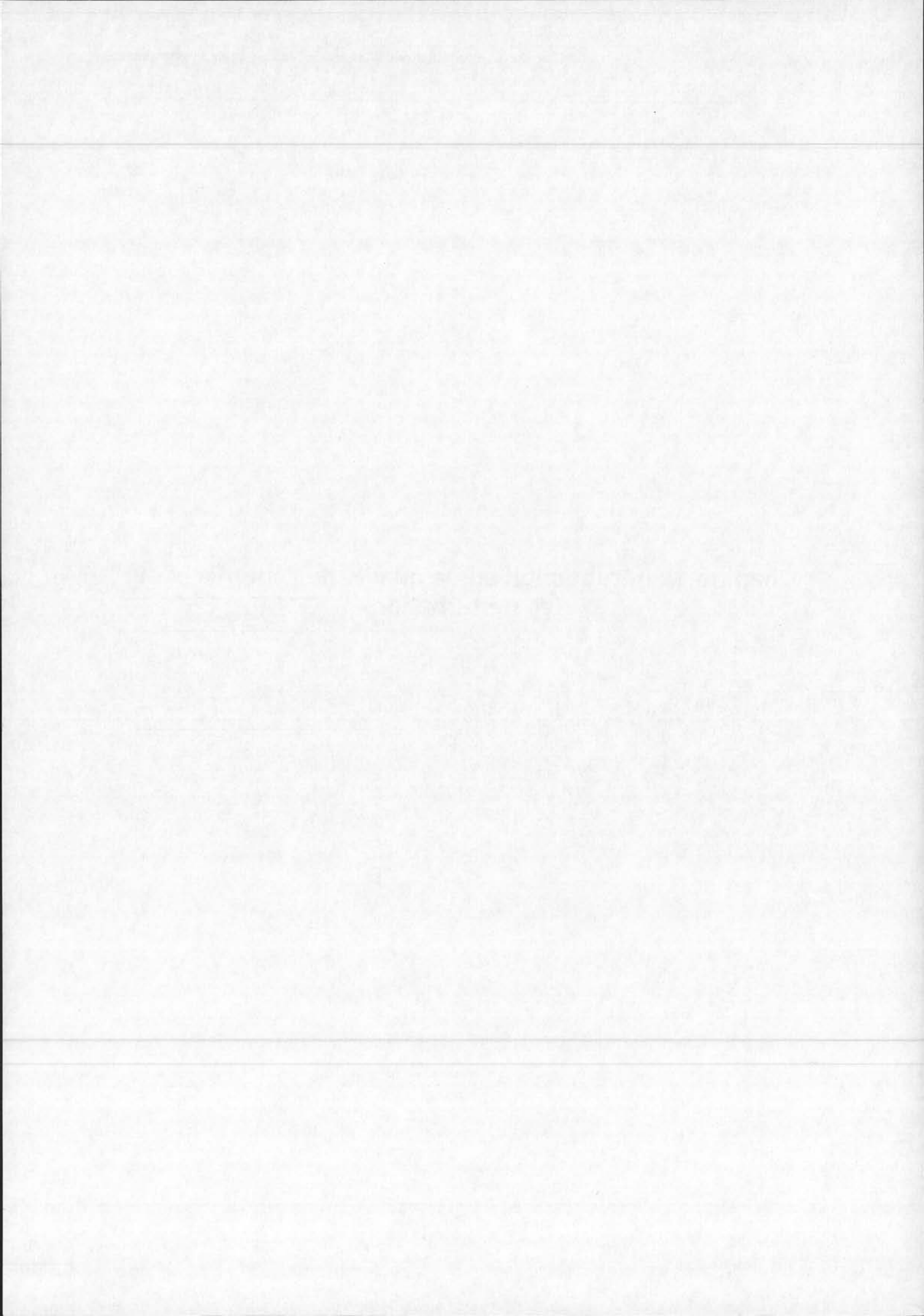


Figure 1 : Les différents réseaux

Conclusion

Par conséquent, il serait primordiale d'informer le client industriel au sujet de problèmes existant ou pouvant survenir dans son installation. Ces informations doivent prévenir le client des causes et des conséquences d'un dysfonctionnement pouvant survenir dans l'installation suite à une perturbation. De ce point de vu, l'intérêt d'élaborer un outil informatique capable de pré diagnostiquer le comportement d'une installation industrielle face aux perturbations s'avère justifiable. EDF a déjà développé un outil informatique dédié à l'étude des harmoniques dans les réseaux. Dans le cadre de cette étude seuls les creux de tension et les coupures brèves seront alors envisagés.

Chapitre 1 : Introduction sur la qualité de l'énergie et sur les perturbations



II Chapitre 1 : Introduction sur la qualité de l'énergie et sur les perturbations

1	La qualité de l'énergie.....	16
2	Les perturbations.....	16
2.1	Les perturbations transitoires : exemple de la foudre [7]-[17].....	17
2.2	Les perturbations longues ou permanentes	17
2.3	Les perturbations brèves	20
2.4	Les creux et coupures brèves [1]-[2]-[6].....	21
3	Les contraintes des réseaux de distribution face aux creux de tension.....	23
3.1	Les charges sensibles [10].....	23
3.2	Le contexte concurrentiel [2].....	24
3.3	Les contraintes structurelles.....	24
4	Définitions des creux de tension et de coupures brèves [2].....	25
4.1	Coupures brèves :.....	25
5	Origines et natures des creux de tension et coupures brèves [1]	25
5.1	Les creux de tension et des coupures brèves sur le réseau du distributeur	25
5.2	Les creux de tension et coupures brèves liés à des phénomènes qui se produisent chez le client.....	28
6	Impact des creux de tension et des coupures brèves sur les équipements industriels [1]-[2] 28	
6.1	Généralités	28
6.2	Effets des creux de tension sur les machines à induction	29
6.3	Effets des creux de tension sur les autres éléments habituels d'une installation industrielle [1].....	31
7	Solutions face aux creux de tension et aux coupures [1]	32
7.1	Solutions de désensibilisations face aux creux et aux coupures provenant du réseau du distributeur :.....	32
7.2	Solutions de désensibilisations face aux creux et aux coupures générés par l'installation d'un client :	33
8	Analyse statistique des creux de tension dans une entreprise industrielle [8]	34

9	Intérêts d'élaborer un outil informatique pour l'étude des creux de tension	37
9.1	Pourquoi un logiciel ?	37
9.2	Quel logiciel ?	37
9.3	Entrées/Sorties du logiciel	38
9.4	Quel futur pour le logiciel ?	39
10	Conclusion	39

Cette étude est axée sur le problème des perturbations dans les réseaux électriques, plus précisément les creux de tension dans les réseaux industriels. Afin de bien situer le cadre de l'étude et de justifier son intérêt, ce chapitre présente une introduction sur la qualité de l'énergie en général et sur les creux de tension en particulier. On justifiera par ailleurs l'intérêt d'élaborer un outil logiciel pour le pré-diagnostic des conséquences des creux de tension dans les réseaux industriels.

1 La qualité de l'énergie

Longtemps ce terme a désigné la disponibilité de l'énergie, donc l'absence d'interruption de la tension. Depuis les années 1980, ce concept a évolué pour désigner la qualité de la tension. Cette évolution est le fait de la multiplication de charges connectées au réseau qui peuvent être affectées par des détériorations de la tension comme les creux de tension ou les harmoniques. On pense ici bien sûr aux machines asynchrones mais aussi aux dispositifs incluant de l'électronique de puissance, de l'électronique de commande et des microprocesseurs. [10]

L'énergie électrique se doit d'être délivrée sous forme d'un système de tensions sinusoïdales triphasées et équilibrées. Ce système de tensions est caractérisé par :

- L'amplitude des trois tensions.
- La fréquence.
- La forme d'onde qui doit être sinusoïdale.
- La symétrie du système triphasé, caractérisée par l'égalité des modules des trois tensions et leurs déphasages relatifs.

La qualité de l'énergie délivrée aux utilisateurs dépend de ces quatre paramètres.

2 Les perturbations

Les perturbations qui peuvent affecter une installation sont de différentes origines et de diverses natures. Elles peuvent être :

1. transitoires : foudre, manœuvres... .
2. longues ou permanentes : harmoniques, fluctuations de la tension (flicker), interruptions de service... .
3. brèves : creux de tension, coupures brèves et surtensions.

2.1 Les perturbations transitoires : exemple de la foudre [7]-[17]

2.1.1 Les surtensions

Les équipements électroniques et informatiques sont très sensibles aux perturbations électromagnétiques et aux surtensions. Ainsi, un circuit intégré peut être détruit ou un système de sécurité peut s'arrêter de fonctionner. Il existe également des risques de pertes de données et/ou de dérèglements informatiques, d'incendies et d'explosions.

2.1.2 La diffusion par les réseaux.

L'électricité, le téléphone, les télécommunications en général constituent des réseaux aujourd'hui très étendus. Sans une protection adaptée, la foudre frappant un point du réseau pourrait avoir des effets presque instantanés à des centaines de kilomètres de prévenir.

2.2 Les perturbations longues ou permanentes

2.2.1 Les harmoniques

Ils se caractérisent par la distorsion de la forme d'onde comme par exemple dans la figure 1. Des ondes de fréquence multiple de la fréquence du réseau apparaissent en plus de l'onde fondamentale. Le niveau de pollution harmonique est caractérisé par le taux de distorsion harmonique défini (THD) par :

$$THD = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \left(\frac{U_h}{U_1}\right)^2}$$

Où U_h et U_1 désignent respectivement les amplitudes du $h^{\text{ème}}$ harmonique et du fondamental.

Dans le cas du réseau de distribution, les harmoniques proviennent principalement de charges non linéaires. Elles produisent des courants harmoniques qui, en circulant à travers des impédances du réseau, créent des tensions harmoniques qui peuvent perturber le fonctionnement des autres utilisateurs raccordés à la même source.

Les principales charges industrielles sources d'harmoniques sont:

- Les équipements d'électronique de puissance : variateur de vitesse, redresseurs, onduleurs et alimentation à découpage.
- Systèmes de l'électronique de puissance: Compensateurs statiques, filtres, régleurs d'impédance...

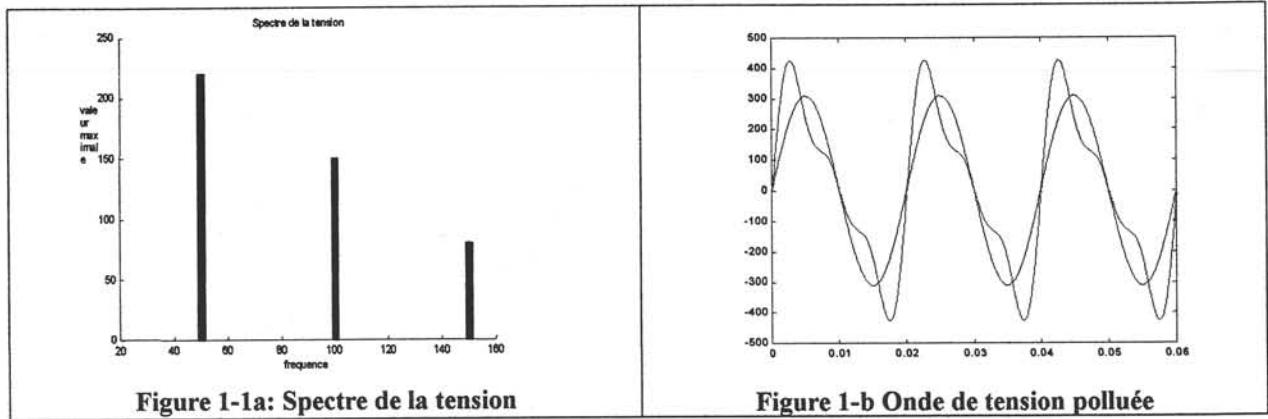


Figure 1-b Onde de tension polluée

2.2.2 Les fluctuations de la fréquence autour de 50Hz

Dans les réseaux industriels, les fluctuations de la fréquence autour de 50 Hz sont rares et ne sont observées que lors de circonstances exceptionnelles. Elles apparaissent souvent lors d'un fonctionnement ilôté quand le groupe générateur n'est pas suffisamment puissant. Cela peut être aussi le fait de défauts graves affectant le réseau de transport ou la production. La figure 2 montre un exemple d'évolution d'une onde de tension affectée.

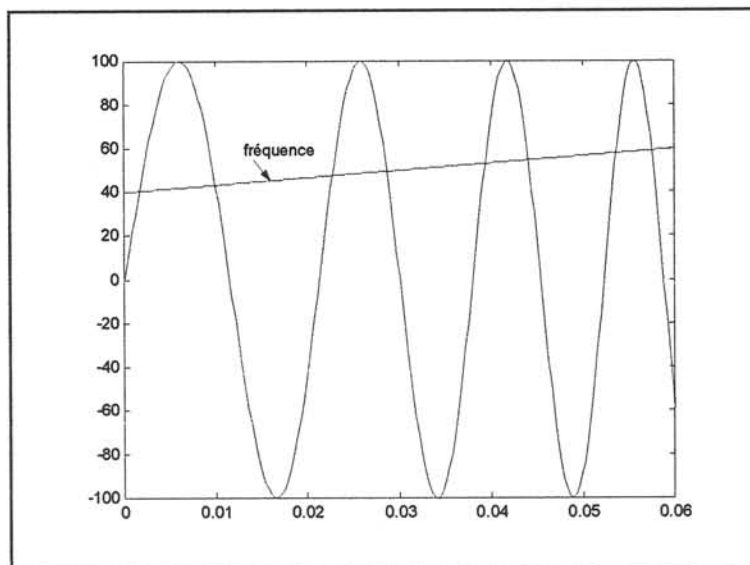


Figure 2: Fluctuation de la fréquence

2.2.3 Les dissymétries du système de tension appelées déséquilibres [1]-[3]

Les déséquilibres observés sur les réseaux de distribution, dont le taux (rapport entre la séquence inverse ou homopolaire et la séquence directe [6]) est généralement inférieur à 2%, n'affectent guère les moteurs. Par contre, il peut apparaître en milieu industriel des conditions locales favorables à l'augmentation de ce taux (présence de fortes charges monophasées). Il semble donc utile à cet égard de rappeler quel est l'effet d'un déséquilibre notable des tensions sur un moteur.

Un déséquilibre des tensions triphasées d'alimentation se traduit par l'existence de trois systèmes de tension : direct, inverse et homopolaire. Le système inverse crée un champ tournant dont la rotation s'effectue en sens inverse de celle du rotor. Par suite apparaissent dans ce dernier des courants de fréquence sensiblement égale au double de la fréquence d'alimentation du moteur. Ces courants peuvent provoquer des échauffements supplémentaires, notamment dans les cages à encoches profondes et les double cages pour lesquelles le coefficient d'augmentation de résistance due à l'effet pelliculaire peut atteindre des valeurs comprises entre 3 et 7, à 100Hz , ainsi que des oscillations de couple.

Le système homopolaire n'exerce aucune influence en raison du couplage (triangle ou étoile avec neutre non relié) des moteurs.

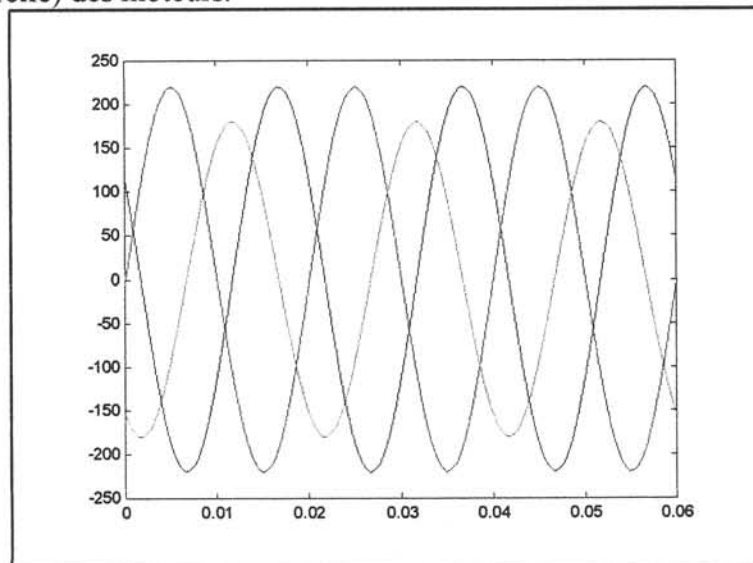


Figure 3: Système de tensions triphasées et déséquilibrées

2.2.4 Les fluctuations rapides de tension (flickers) [1]-[2]

Les variations de tension sont des variations de la valeur efficace ou de la valeur crête d'amplitude inférieure à 10% de la tension nominale.[2]

En règle générale, la plupart des appareils d'utilisation ne sont pas gênés par ce type de perturbation, car l'amplitude de ces à-coups de tension est comprise dans le domaine contractuel de variation de la tension d'alimentation ($\pm 10\%$ de la tension nominale). [1]

Les fluctuations de tension sont principalement dues à des charges industrielles rapidement variables comme les machines à souder, les laminoirs et les fours à arc [2]: Pour ces derniers, l'arc électrique étant de nature instable, le courant appelé par le four varie très fortement en amplitude et en phase, ce qui entraîne des fluctuations de tension à des fréquences

globalement comprises entre 1 et 30 Hz. Or, dans cette gamme de fréquences, l'œil est très sensible aux papillotements de l'éclairage dus à ces fluctuations de tension. Le phénomène est ainsi appelé "flicker" [1]

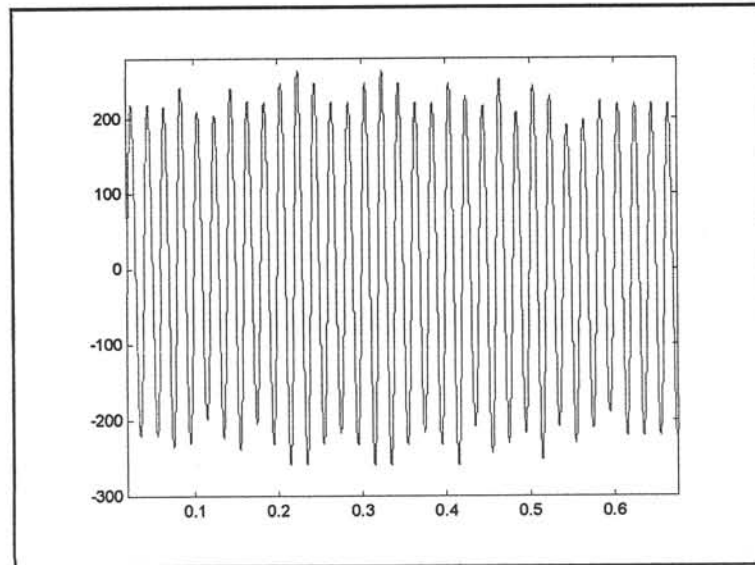


Figure 4: Fluctuation de la tension

2.3 Les perturbations brèves

2.3.1 *Les surtensions* [1]

Une surtension est une élévation de la valeur crête de la tension et dont l'amplitude sort d'un gabarit défini par une norme ou une spécification.

Les surtensions sont de trois natures :

- temporaires à fréquence industrielle

Les surtensions temporaires peuvent être d'origines diverses : défaut d'isolement, surcompensation d'énergie réactive, mauvaise régulation d'un alternateur...

- de manœuvre

Une surtension de manœuvre est une surtension entre phase et terre ou entre phases, engendrée par une manœuvre d'appareil ou par un défaut. Les surtensions de ce type sont habituellement fortement amorties et de courte durée.

- d'origine atmosphérique

Elles sont principalement dues à la foudre, voir pour cela le §I.2.1, ces perturbations sont considérées comme transitoires rapides.

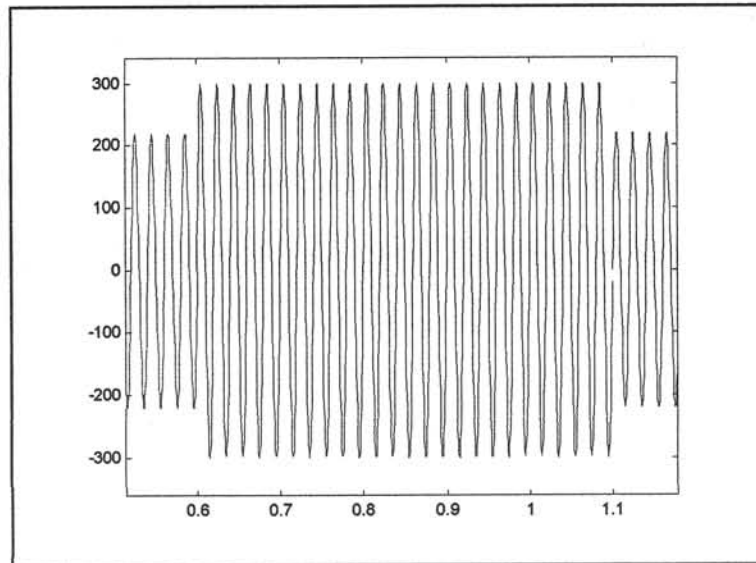


Figure 5: Surtension

2.4 Les creux et coupures brèves [1]-[2]-[6]

Un creux de tension est une baisse brutale de la tension en un point d'un réseau d'énergie électrique, à une valeur comprise entre 90% et 10% (IEE 1159) d'une tension de référence suivie d'un rétablissement de la tension après une période allant de 10ms à 1 minute. Les coupures brèves sont un cas particulier des creux de tension de profondeur supérieure à 90% (IEEE1159) et de durée allant jusqu'à 1 minute. [6]

Les creux et coupures brèves provoquent des effets instantanés sur le fonctionnement des appareils d'utilisation. Ils se matérialisent par des ouvertures intempestives des contacteurs et de relais, défauts de commutations des onduleurs, défauts de fonctionnement de systèmes électroniques analogiques ou numériques, erreurs d'exécution de calculs informatiques, etc.. Par contre la remontée de la tension qui survient à la disparition d'un creux de tension, provoque des surintensités dans les machines tournantes; ceci donne lieu à des échauffements et des efforts électrodynamiques de brèves durées qui peuvent avoir des effets à long terme (vieillessement).

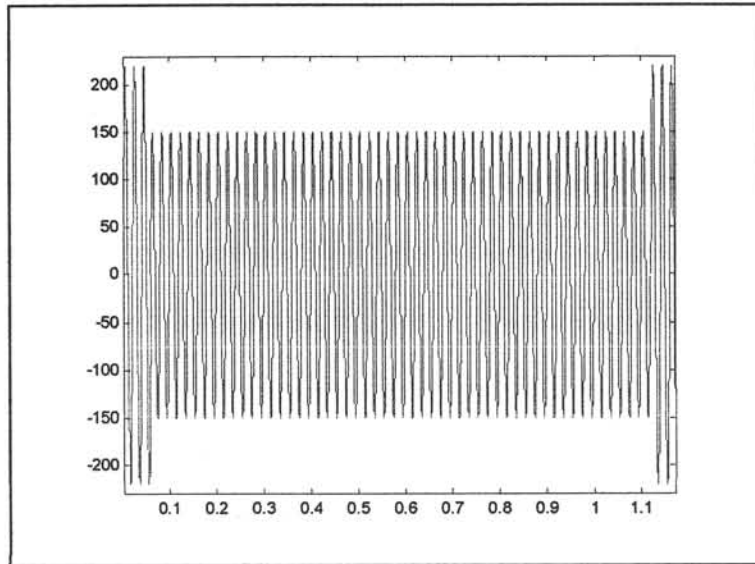


Figure 6: Creux de tension

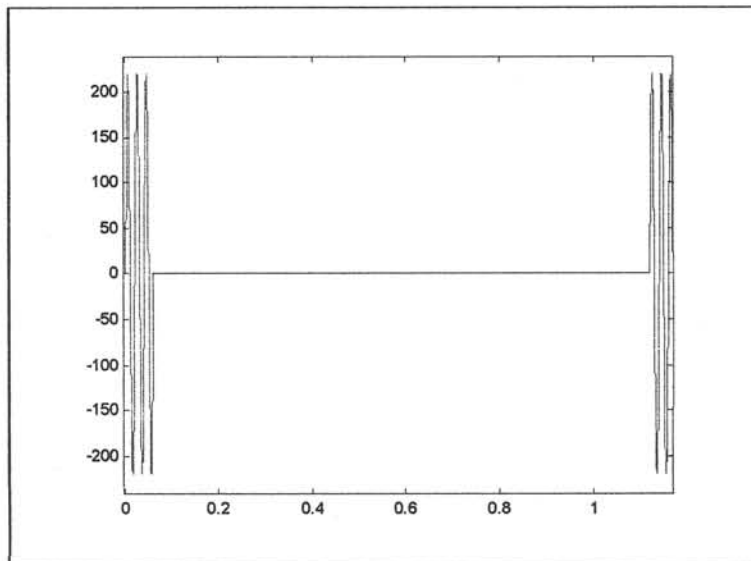


Figure 7: Coupure brève

3 Les contraintes des réseaux de distribution face aux creux de tension

La sensibilité d'un réseau envers les perturbations comme les creux de tension, dépend principalement des contraintes :

- dues à la présence de charges sensibles au sein de l'installation
- liées au concept concurrentiel dans lequel rentrent les considérations de coûts
- structurelles du réseau

3.1 Les charges sensibles [10]

On peut parler de consommateurs sensibles ou critiques pour :

- des procédés fonctionnant en continu (papeteries, usines textile...)
- des systèmes impliquant le respect absolu de la sécurité des personnes et des biens (hôpitaux, aéroports, installations militaires, grands postes de transformations...)
- des industries de précision, de haute technologie (sites de production de composants électroniques...)
- des systèmes d'information (banques, télécommunications...)

La criticité des trois derniers types d'installations est notamment liée à la présence de charges sensibles comme des dispositifs informatiques, de contrôle/commande, de mesures et d'électronique de puissance. Des normes s'efforcent d'indiquer les tolérances aux différentes perturbations selon les niveaux de puissance et le type de charges.

La plus connue de ces recommandations est la courbe ITI (pour Information Technology Industry Council), anciennement appelée courbe CBEMA (voir Figure 8) (développée pour ses besoins propres par Computer Business Equipment Manufacturers Association)-[10] Cette recommandation est devenue de fait un standard pour tout équipement et systèmes de puissance.

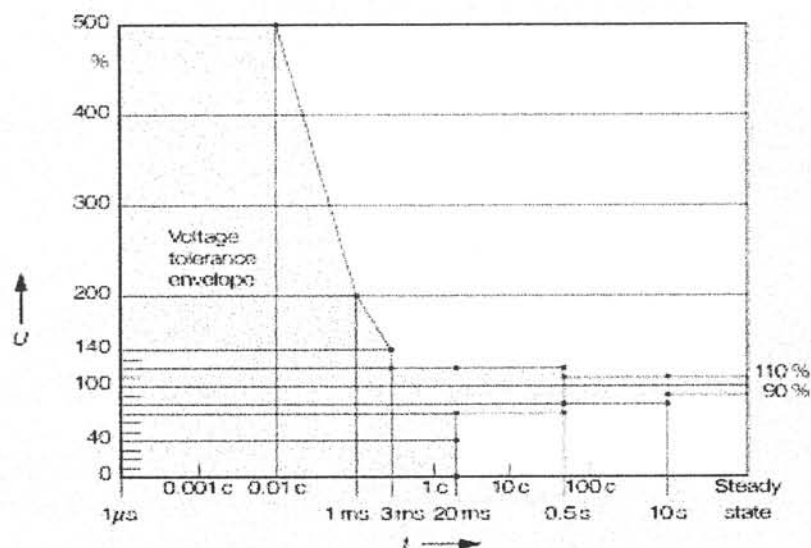


Figure 8: Courbe de tolérance ITI (CBEMA)]

Les autres recommandations concernant la qualité des signaux sont dérivées des normes en vigueur comme par exemple les normes [4]

- NF EN 61000-4-11 intitulée : Essais d'immunité aux creux de tension, coupures brèves et variation de tension (Janvier 95)
- NF EN 61000-3-3 intitulée : Limitation des fluctuations de tension et du flicker dans les réseaux basse tension pour les équipements ayant un courant appelé <16A

3.2 Le contexte concurrentiel [2]

La qualité de l'énergie est devenue un sujet stratégique pour les compagnies d'électricité ainsi que pour les industriels, essentiellement pour des raisons qui sont :

- l'accroissement de la compétitivité des entreprises en :
 - réduisant le coûts liés à l'interruption de la continuité de service et à la non-qualité
 - réduisant le coût lié au surdimensionnement des installations : en vu de prévoir une évolution de l'installation et réduire le risque d'échauffement en cas de surintensités
- une assurance de la continuité et la qualité de production : l'arrêt temporaire d'une chaîne peut provoquer l'arrêt de l'ensemble de l'outil de production (fabrication de semi-conducteurs, cimenterie, traitement de l'eau, imprimerie, ...)
- l'adaptation aux évolutions du marché de l'électricité (production décentralisée, possibilités pour les gros consommateurs de choisir leur fournisseur).

3.3 Les contraintes structurelles

Les contraintes structurelles influent principalement sur l'amplitude des creux de tension et leur propagation. Ainsi les caractéristiques des creux de tension dépendent directement de la structure du réseau, de la longueur des lignes, du nombre de départs par postes source raccordés sur le même jeu de barres et notamment de la puissance de court-circuit. Plus la puissance de court circuit est faible en un point du réseau et plus l'amplitude du creux est importante si l'origine du creux est située en ce nœud.

D'autre part, le couplage des transformateurs influe sur la nature des creux, ainsi un creux monophasé ou biphasé au primaire du transformateur, peut devenir selon le couplage biphasé ou triphasé.

4 Définitions des creux de tension et de coupures brèves [2]

Creux de tension :

Un creux de tension est la diminution de l'amplitude de la tension, de 10 % à 90 % de la valeur nominale au niveau d'une ou de plusieurs phases de l'installation, pour une durée allant de 10ms à 1 minute [6]. Les creux de tension sont caractérisés par leur amplitude et par leur durée.

4.1 Coupures brèves :

Une coupure brève est la diminution simultanée de l'amplitude des trois tensions de phase d'une installation à une valeur n'excédant pas 10% de l'amplitude nominale et pour une durée ne dépassant pas une minute. [6]

Remarques : Aujourd'hui, il n'y a pas de définition universelle du creux de tension et de la coupure brève. la définition, en particulier de l'amplitude et de la durée, varie suivant les différentes normes existantes :

5 Origines et natures des creux de tension et coupures brèves [1]

Les creux de tension et les coupures brèves subis par un client sont principalement liés à :

- des défauts d'isolement apparaissant sur le réseau de transport, de répartition ou de distribution
- des phénomènes qui se produisent chez le client

5.1 Les creux de tension et des coupures brèves sur le réseau du distributeur

Les causes exogènes sont les conditions atmosphériques (dans plus de 70% des cas pour un réseau aérien), les amorçages avec des corps étrangers (végétation, animaux, percussion de véhicules ,...) et les actes de malveillances.

Les causes endogènes correspondent principalement à des défaillances de matériels (lignes, câbles, transformateurs...).

Les défauts sont de différents types:

1. monophasés, biphasés ou triphasés suivant le nombre de phases atteintes:
 - monophasé quand une seule phase est affectée et sa tension est réduite
 - biphasés quand deux phases sont affectées par un creux la troisième restante saine
 - triphasés quand les trois phases sont affectées simultanément .

2. auto-extincteurs, fugitifs ou permanents suivant leur durée :

- auto-extincteurs : défauts qui s'éliminent d'eux-mêmes
- fugitifs : défauts qui s'éliminent après ouverture des disjoncteurs
- permanents : défauts durables qui nécessitent une mise hors tension définitive de l'ouvrage et une intervention de maintenance pour remettre l'ouvrage en service.

• ***Principales caractéristiques des défauts enregistrés aux différents niveaux de tension***

Les causes, le nombre et le type de défauts varient suivant le type de réseau, aérien ou souterrain et suivant le niveau de tension (HTB,HTA):

Type de réseau	Principales causes de défauts	Principaux types de défauts	Occurrence des défauts HTB	Occurrence des défauts HTA
Aérien	Conditions climatiques Amorçage avec des corps extérieurs	Monophasés fugitifs	Peu fréquent	Fréquent
Souterrain	Avaries de matériels	Monophasés permanents	Rare	Peu fréquent

• ***Caractéristiques des creux de tension et des coupures en fonction des défauts d'isolement***

Les creux de tension :

Un creux de tension vu par un client est une chute de tension provoquée par un défaut d'isolement apparaissant, soit sur un ouvrage au voisinage, soit sur sa ligne d'alimentation, soit à un niveau de tension supérieure.

- **L'amplitude** du creux de tension est conditionnée par la structure du réseau, notamment la puissance de court circuit et par la distances entre le point de défaut et le point où est situé le client sur le réseau. Ainsi, plus la puissance de court-circuit en amont est élevée plus l'amplitude du creux de tension est faible.
- **La durée** du creux de tension est conditionnée par le temps de maintien du défaut. Cette durée dépend du temps de détection et de localisation du défaut, des temporisations éventuelles mises en œuvre avant envoi de l'ordre d'ouverture des disjoncteurs et du temps nécessaire à l'ouverture des disjoncteurs.
- **La propagation** du primaire au secondaire des défauts monophasés et biphasés dépend du couplage du transformateur. La transmission se fait sans atténuation pour les défauts triphasés. Par contre les creux de tension subissent une forte atténuation lors du passage du secondaire au primaire.

Les coupures

Une coupure est provoquée par l'ouverture des disjoncteurs afin d'éliminer le défaut apparaissant sur la ligne d'alimentation du client.

- La durée des coupures est donc conditionnée par le temps pendant lequel les disjoncteurs sont ouverts.

- *les creux de tension et les coupures brèves vus par les clients HTB, HTA et BT*

Clients HTB

Les creux de tension subis par un client raccordé sur le réseau de répartition sont liés à des défauts issus de ce niveau de tension, du réseau de transport et des réseaux internes des clients raccordés à ce niveau de tension. Quelques creux de tension peuvent provenir d'incidents survenus en HTA au niveau du jeu de barres ou au niveau des transformateurs des postes sources.

Le nombre de coupure brèves pour les clients HTB est faible: en moyenne moins de 2 par an. La durée des creux de tension est en général comprise entre 80 et 500 ms.

Clients HTA et BT

Les creux de tension et les coupures subis par un client raccordés en HTA sont liés à des défauts issus du réseau de transport, de répartition et de distribution HTA.

Les creux de tension et les coupures subis par un client raccordés en BT sont liés d'une part à des défauts issus du réseau de transport, de répartition, et de distribution HTA et BT, et d'autre part à des défauts générés sur le réseau internes des clients.

A noter que généralement les défauts monophasés générés sur le réseau de distribution HTA ne provoquent pas de creux de tension chez les clients raccordés à proximité, du fait de la nature du couplage de leur transformateur.

Le nombre moyen de creux de tension et de coupures brèves dépend du type de départ sur lequel se situe le client (aérien ou souterrain), de la longueur des lignes, du nombre de départs par poste source raccordés sur le même jeu de barres. Les clients les plus perturbés sont raccordés sur des lignes aériennes, (près de 2 à 5 fois plus que des lignes souterraines), sur des lignes longues ou sur des lignes raccordées sur un jeu de barres comportant beaucoup de départs.

- La durée des coupures brèves est en général inférieure à 30 secondes
- La durée des creux de tension est en général inférieure à 600 ms et leur amplitude est inférieure à 50 %.

5.2 Les creux de tension et coupures brèves liés à des phénomènes qui se produisent chez le client

Les creux de tension sont causés également par des phénomènes qui prennent naissance sur le réseau des clients soit dans l'installation d'un client voisin situé sur le même départ ou dépendant du même jeu de barres. ils sont très rarement perceptibles par les clients raccordés au niveau de tension supérieure.

Ils sont dus à des appels de courant importants, provoquant ainsi des à-coups de tension qui sont liés :

- au démarrage direct de gros moteurs,
- à l'enclenchement de charges importantes
- à l'enclenchement de charges particulières (comme les transformateurs et les condensateurs)
- à des défauts d'isolement survenant sur une partie de l'installation.

L'amplitude du creux de tension est fonction du rapport entre la puissance de court-circuit disponible à l'endroit où se produit cet impact et la puissance de la charge enclenchée. Plus le rapport est élevé, moins le creux de tension est important.

6 Impact des creux de tension et des coupures brèves sur les équipements industriels [1]-[2]

6.1 Généralités

Les creux de tension et les coupures brèves sont susceptibles de perturber le fonctionnement de certaines installations industrielles. Les conséquences techniques dépendent du type de matériel et sont conditionnées par le type de charge du système.

Certains effets sont instantanés ou à court terme. Nous rappelons qu'ils se produisent principalement au niveau :

- Des contacteurs et relais thermiques : les creux de tension provoquent des manœuvres intempestives des contacteurs et relais.
- Des convertisseurs : défauts de commutation des onduleurs.
- Des systèmes électroniques analogiques ou numériques : défauts de fonctionnement ou erreurs d'exécution de calculs informatiques

D'autres effets sont à action différée, principalement au niveau des moteurs. En effet la remontée de tension, constituant l'ultime séquence de tout creux de tension, peut provoquer une surintensité dans les machines tournantes ; ceci donne lieu à des sur-échauffements et des efforts électrodynamiques de brèves durées, susceptibles d'engendrer une fatigue du matériel préjudiciable à terme. Les effets cités précédemment se manifestent de façon appréciable à partir d'un certain niveau de profondeur du creux de tension [1] .

Enfin, les conséquences des creux de tension et des coupures brèves sont parfois aussi économiques. Ces perturbations peuvent engendrer : une perte ou une altération de la

production, une détérioration de l'outil de production, une perte de temps pour la remise en état et la remise en route de l'outil de production...

6.2 Effets des creux de tension sur les machines à induction

La machine à induction (asynchrone) est l'une des charges principales présente dans les réseaux industriels. En effet plus de la moitié de l'énergie consommée en milieu industriel est utilisée par ces machines, d'où l'importance de leur comportement face au creux de tension.

- **Variation du couple électromagnétique avec le carré de la tension.**

Les creux de tension sur les machines asynchrones affectent considérablement leur fonctionnement. En effet, la caractéristique du couple électromagnétique varie avec le carré de la tension :

$$C(g) = \frac{3 * V^2}{\Omega / q} * \frac{R_r' / g}{(N * w_s)^2 + (R_r' / g + R_s)^2}$$

Équation 1

Les différentes grandeurs de l'Équation 1 sont définies sur la base du schéma équivalent en régime permanent présenté ci-dessous.

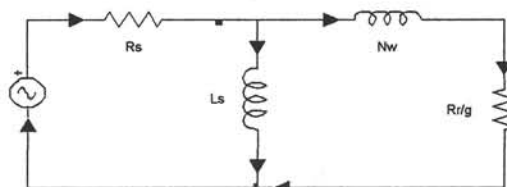


Figure 9: Schéma monophasé étoile équivalent de la machine à induction

Où

- “Rs” représente la résistance statorique.
- “Ls” représente l'inductance de magnétisation.
- “Nf” représente les fuites totales ramenées au stator.
- “R_r'” représente la résistance rotorique.
- “g” représente le glissement.

Enfin, Ω représente la vitesse mécanique de la machine et q son nombre de paire de pôles.

Par la suite de cette variation du couple électromagnétique (Figure 10), la vitesse mécanique décroît lors d'un creux de tension et la puissance absorbée est modifiée. Un creux de tension assez profond peut même provoquer le décrochage de la machine asynchrone.

Par exemple, pour une machine asynchrone de puissance mécanique 37 kW et de tension nominale composée 400V, la caractéristique du couple est représentée sur la Figure 11 pour deux valeurs de la tension; pour $U=U_n$ en trait continu et pour $U=70\% U_n$ en pointillée.

- **Détermination des différentes phases de fonctionnement durant un creux de tension.**[1]

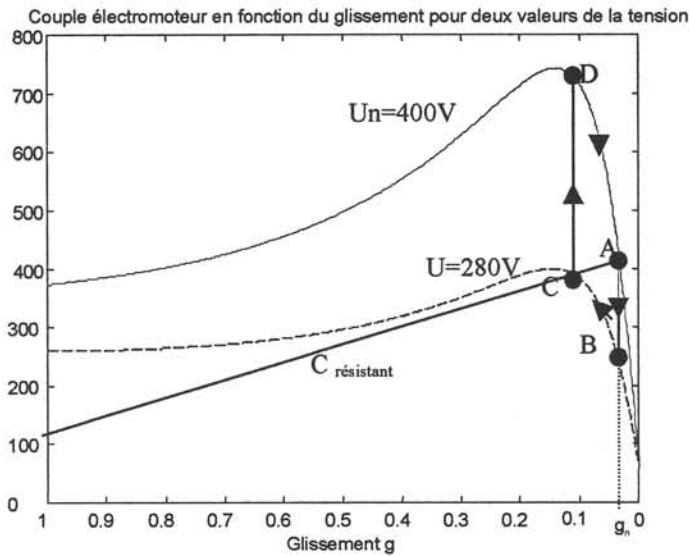


Figure 10: Variation du couple pendant un creux et au rétablissement

Sur la Figure 10 le point **A**, correspond au point de fonctionnement nominal (sous U_n et à la vitesse nominale).

À l'apparition d'un creux de tension, le couple électromagnétique varie avec le carré de la tension. La vitesse mécanique est supposée constante pendant cette variation, la constante de temps mécanique étant beaucoup plus grande que la constante de temps électrique. Le point de fonctionnement de la machine se trouve alors en **B**.

Pendant toute la phase du creux de tension, le couple varie suivant l'arc **BC**, et si la durée du creux est suffisamment longue, la machine retrouve un nouveau point de fonctionnement stable en **C**.

Quand la tension se rétablit, autrement dit, lors de la disparition du creux, le couple électromagnétique croît. La vitesse étant toujours supposée constante pendant cette croissance, le point de fonctionnement de la machine se trouve en **D**.

À partir du point **D**, la vitesse commence à augmenter, le point de fonctionnement varie suivant l'arc **DA**, pour retrouver le point nominal en **A**.

6.3 Effets des creux de tension sur les autres éléments habituels d'une installation industrielle [1]

- ***Les machines synchrones***

Les effets des creux de tension sur les machines synchrones, sont analogues à ceux évoqués dans le cas des machines à induction (variation du couple électromagnétique et de la vitesse mécanique). Toutefois, le couple n'étant pas lié au carré de la tension d'alimentation, et en raison de leur forte valeur d'inertie liée à leur puissance généralement importante, les machines synchrones peuvent supporter des creux de tension plus importants que les machines à induction (de l'ordre de 50% sans décrocher). Cependant, en cas de décrochage, le moteur s'arrête et il faut reprendre tout le processus de démarrage qui est assez complexe.

- ***Les organes de commande et de protection (contacteurs, disjoncteurs équipés de bobines à manque de tension...)***

Ils peuvent être sensibles aux creux de tension dont la profondeur dépasse 25%. En effet, pour un contacteur classique, il existe une valeur minimale (tension de retombée) en dessous de laquelle les pôles se séparent et transforment un creux ou une coupure brève en une coupure de longue durée allant jusqu'à plusieurs heures. Équipements informatiques

Ces équipements sont sensibles aux creux de tension de profondeur 10% et plus. Se référer à la courbe ITI (CBEMA) déjà présentée),

Les creux de tension dont les caractéristiques sont en dehors de cette zone de tolérance, peuvent provoquer des pertes et des altérations dans la transmission de l'information et donc induire des dysfonctionnements dans les programmes en cours d'exécution.

- ***Dispositifs électroniques de régulation***

Ces dispositifs sont conçus pour supporter une plage de variation de leur tension d'alimentation. Cependant au-delà d'une durée, une variation de la tension entraîne une défaillance dans leur fonctionnement.

7 Solutions face aux creux de tension et aux coupures [1]

7.1 Solutions de désensibilisations face aux creux et aux coupures provenant du réseau du distributeur :

Un défaut d'isolement provoque un court-circuit où s'écoule un courant important qui provoque une variation brutale de la tension. Les courants de défauts peuvent atteindre des valeurs élevées, constituant un danger pour les personnes et le matériel.

- Afin de limiter l'impact en durée de ces courants de défauts, une solution souvent adoptée par les distributeurs consiste à mettre hors tension l'ouvrage concerné par le défaut, en déclenchant le ou les disjoncteurs qui le relie au reste du réseau .
- Afin d'assurer la reprise de service le plus rapidement possible, un automatisme de réenclenchement associé au système de détection et d'élimination du défaut est installé pour les réseaux aériens.
-

Le principe d'élimination des défauts et de reprise de service diffère suivant les niveaux de tension :

- Sur le **réseau de distribution BT** il y a mise hors tension définitive des ouvrages en défauts par fonctionnement de la protection (disjoncteur ou fusible situé au poste de distribution public).
- Sur le **réseau de distribution HTA** les départs aériens sont équipés d'un disjoncteur associé à un dispositif de réenclenchement triphasé rapide et lent. En cas de défaut, il y a une séquence d'ouvertures et de fermetures du disjoncteur en tête de départ. Les départs souterrains sont équipés uniquement d'un disjoncteur sans dispositif de réenclenchement. En cas de défaut, le disjoncteur est ouvert définitivement, du fait que les défauts sont généralement permanents.
- Sur les **réseaux HTB** le principe d'élimination des défauts est basé essentiellement sur l'utilisation de protections de distance, qui permettent d'assurer une sélectivité dans le déclenchement des disjoncteurs, en fonction de la localisation du défaut. Sur les réseaux aériens, afin d'assurer une reprise de service, ce système de protection est associé à un système de réenclenchement automatique.

A ces dispositifs de désensibilisation s'ajoutent les dispositifs de l'électronique de puissance modernes tels les DVR (Direct Voltage Restorer). Ces derniers, par le truchement d'injection de puissances active et réactive au réseau client, permettent de fait une complète insensibilisation au creux ayant une origine amont. Il faut aussi différencier ces systèmes des alimentations sans interruption qui ne protègent qu'une petite partie d'installation.

7.2 Solutions de désensibilisations face aux creux et aux coupures générés par l'installation d'un client :

- ***Actions ponctuelles pour limiter les creux de tension***

Le client doit veiller lui-même à ne pas perturber le réseau et les autres clients. En effet, ses propres installations peuvent provoquer des perturbations sur le réseau y compris chez les autres clients.

Les chutes de tension provoquées par les équipements d'un client sont réduites en augmentant le niveau de puissance de court circuit disponible à leur point de raccordement. Il suffit alors de prévoir une alimentation des charges du client, qui sont à l'origine de la chute de tension, le plus en amont possible sur le réseau du distributeur.

Quelques actions ponctuelles peuvent également être mises en œuvre, en particulier pour se prémunir contre des chutes de tension provoquées par des démarrages de moteurs :

- installer un système de démarrage afin de limiter l'appel de courant .
- installer un compensateur statique d'énergie réactive qui compense l'appel de puissance réactive au moment du démarrage. Cette solution est cependant à court terme coûteuse .

- ***Solutions efficaces chez les clients pour se protéger contre les creux de tension et les coupures brèves***

Les équipements les plus sensibles, dans les secteurs industriels et tertiaires, sont essentiellement le contrôle commande soit par ordre décroissant, les automates, les calculateurs, la commande des entraînements à des vitesses variables, les systèmes du type pont de diode capacitif.

Bien qu'il soit toujours préférable de se préoccuper de l'influence éventuelle des creux de tension et des coupures brèves sur l'installation lors de la conception, le problème se pose le plus souvent en phase opérationnelle. C'est le but de l'action de désensibilisation.

Deux types de solutions peuvent être mises en place pour limiter les effets des creux de tension et des coupures brèves :

- La première consiste à comparer le manque d'énergie par un dispositif intercalé entre le réseau et l'installation à désensibiliser. Les dispositifs utilisés sont les alimentation sans interruption (ASI), les groupes à volant d'inertie (GVI)...
- La deuxième à améliorer l'immunité de l'installation. Des actions ponctuelles sont proposées pour les moteurs et les équipements à vitesse variable.

Il y a lieu de distinguer deux fonctions lorsque l'on cherche à désensibiliser une installation industrielle :

- la fonction contrôle-commande et son alimentation

D'une façon générale, le contrôle-commande doit être désensibilisé pour assurer une bonne continuité d'exploitation. La solution est souvent la mise en place d'une source à réserve d'énergie, qui, du fait des faibles puissances mises en œuvre, est peu coûteuse.

- la fonction de l'alimentation en puissance des équipements.

La partie puissance peut utiliser l'inertie des machines en tant que réserve d'énergie, mais les solutions radicales sont plus coûteuses compte tenu des niveaux de puissance à désensibiliser.

La désensibilisation peut se faire en trois niveaux :

- 1- procéder à un arrêt propre avec possibilité de redémarrage automatique
- 2- procéder à une reprise à la volée. Il faut vérifier au préalable que les conditions de reprise sont assurées en particulier pour le process associé,
- 3- immuniser toute la force motrice. Il faut alors mettre en place un dispositif à réserve d'énergie ;

8 Analyse statistique des creux de tension dans une entreprise industrielle [8]

Les analyses des creux de tension ont débutés en 1974 [8]. Depuis avril 1982, un suivi systématique s'appuyant sur un rapport micro-informatique a été effectué [9]. Chaque incident est ainsi répertorié et personnalisé, avec ses conséquences sur l'usine.

Ce paragraphe, présente une base d'étude d'un enregistrement réalisé sur les jeux de barres 20 KV du poste source d'alimentation électrique dans l'entreprise sidérurgique SOLMER, actuellement appelée SOLLAC, spécialisée dans la production d'acier plat pour différentes applications (automobiles, emballage, électroménager, bâtiment et constructions mécaniques)

8.1.1 Conséquences des creux de tension sur SOLMER

La mise en place d'un système d'enregistrement des creux de tension a été rendue nécessaire par les conséquences importantes des creux de tension sur le fonctionnement des installations. Parmi celles-ci les plus importantes sont :

- Le basculement automatique de source
- La fusion de fusibles et perte de thyristors,
- Le déclenchement de groupe à volant d'inertie pour mise en sécurité d'équipements informatiques (calculateurs, automates, ...)
- La perte de relai alternatif
- La perte de l'éclairage de halles

8.1.2 Comment identifier un creux de tension

Les phénomènes qui sont à l'origine des creux peuvent prendre naissance dans le réseau d'alimentation ou sur le réseau SOLMER ou encore sur celui d'un client EDF proche de SOLMER. Pour permettre l'identification et la comparaison avec les relevés d'EDF les creux ont été quantifiés par la profondeur du creux sur chaque phase et la durée totale de la perturbation. Chaque creux est alors identifié dans un relevé commun EDF/SOLMER. Le tableau 1 présente une identification des creux de tension :

Date	Heure	Jeu de barres A		Jeu de barres B		Causes
		Creux en %	Durée en ms	Creux en %	Durée en ms	
4 Juillet	14h00	10	100	RAS	RAS	
	21h19	15	200	15	200	
	21h19	10-60	200	60	120	Brouillard
			80-120	10-60	120	
21h29	10-70	250-80			Incident interne	
	10-70	320-10				
11 Juillet	15h16	15	350	15	350	Orage
25 Juillet	7h37	10-35	80-120	10-35	60-120	Brouillard
		35	200	35	120	
	7h38	10	180			Brouillard
	7h40	50	160			Brouillard
	7h40	50	300			Brouillard
30 Juillet	19h16	10	250	10	250	Orage
5 Août	22h42	15	120	15	120	Orage
	22h55	50	120	50	200	Orage

Tableau 1: Identification des creux de tension

8.1.3 Les statistiques

337 creux ont été identifiés en 4 ans. Les tableaux suivants résument leur répartition et leurs causes.

Années	Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total
82		0	1	1	3	2	20	25	13	13	4	25	0	107
83		4	9	6	6	1	6	3	29	2	29	9	3	107
84		2	7	1	2	7	9	2	25	13	2	2	3	75
85		0	0	1	0	6	4	9	7	4	11	6	0	48
Total		6	17	9	11	16	39	39	74	32	46	42	6	337

Tableau 2 : Répartition des creux de tension

	SOLMER	EDF	ORAGE	INCENDIE.	VENT	BROUILLARD	AUTRE
ANNEE							
1982	11	3	80	13	0	0	0
1983	8	2	91	5	0	1	0
1984	6	2	63	1	3	0	0
TOTAL	25	7	234	19	3	1	0

Tableau 3: Causes détaillées des creux de tension

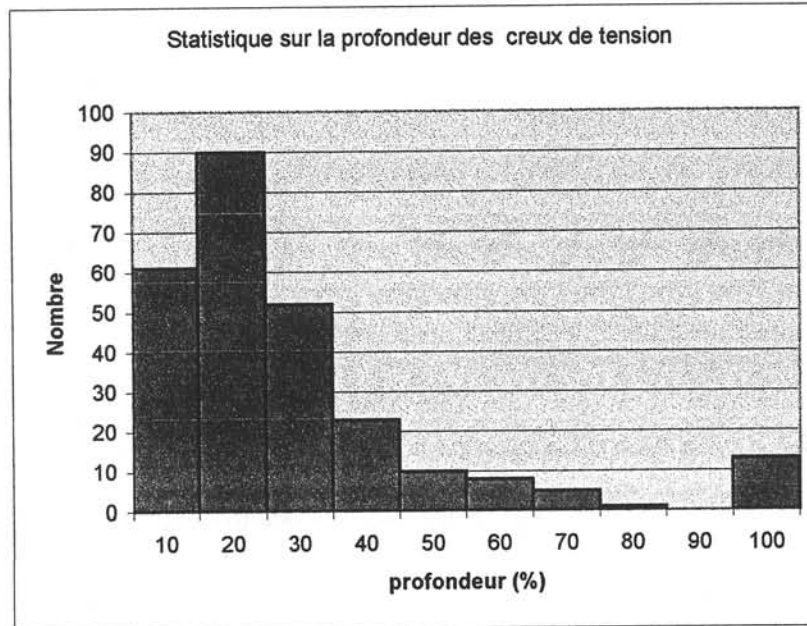


Tableau 4: Statistique sur la profondeur des creux de tension

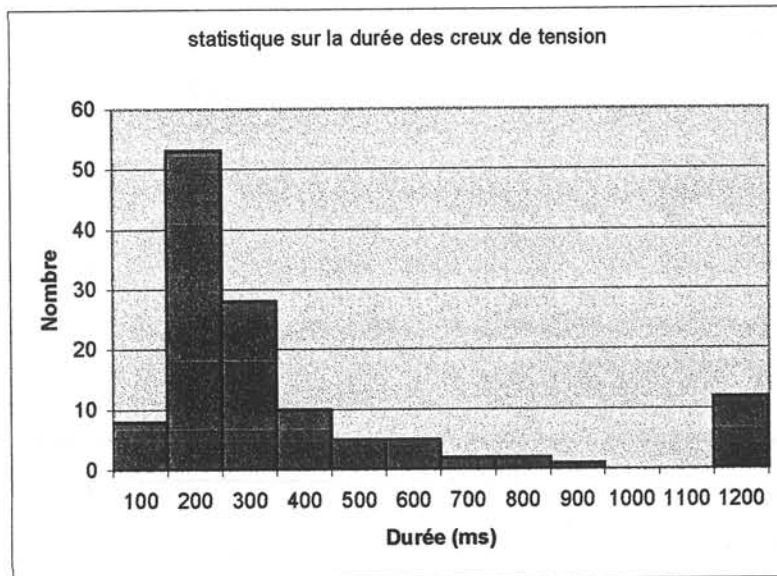


Tableau 5: Statistique sur la durée des creux de tension

D'après les statistiques présentées dans le Tableau 4 et le Tableau 5, montrent que les creux les plus fréquents sont des creux d'une profondeur allant jusqu'à 30% et de durée de 200 à 300 ms. On définit alors un creux type de 30% de profondeur et de durée 300ms. En effet 60 à 70% des perturbations sont des creux dont la profondeur et la durée sont inférieures à celle du creux type.

9 Intérêts d'élaborer un outil informatique pour l'étude des creux de tension

9.1 Pourquoi un logiciel ?

Dans le milieu industriel, les creux de tension et les coupures brèves sont un problème majeur qui pénalisent le fonctionnement des réseaux et affectent les procédés en cours. Dans le but de mieux étudier ces problèmes pour un réseau industriel donné, il est indispensable qu'à partir d'un cahier de charges de réseau industriel donné de :

- pouvoir les modéliser et pré diagnostiquer ainsi l'apparition et les effets des creux de tension dans une installation industrielle ;
- Cibler éventuellement les origines de défauts et ainsi pouvoir les prévenir ;
- Proposer ultérieurement des solutions de désensibilisation.

A cet effet il est nécessaire d'élaborer des méthodes de simulation alliant précision, rapidité d'obtention des résultats et généricité.

9.2 Quel logiciel ?

Pour ce logiciel, il est important de concevoir un outil générique et de créer une bibliothèque de modèles des divers éléments d'un réseaux industriels (lignes, transformateurs, moteurs à induction ...). Certes, certains logiciels de simulation existent, mais ils ne sont pas optimisés pour ce problème précis. En effet, les logiciels classiques comme MATLAB ou SABER présentent des modèles de machines asynchrones assez classiques mais qui sont d'ordre supérieur à celui requis par une telle étude. De même certains modèles ne prennent pas en compte l'effet de peau, essentiel pour l'étude des creux de tension provoqués par un démarrage de moteur à induction. Enfin, en milieu industriel, les données disponibles sont assez limitées et il faut donc penser à pouvoir modéliser les charges en se basant sur un minimum d'information.

Ce logiciel est basé d'une part sur :

- une modélisation d'ordre réduit de la machine asynchrone adaptée au problème des creux de tension et coupures brèves
- le calcul de la propagation de tension dans les réseaux, en combinant un algorithme de « load flow » avec les modèles dynamiques des charges présentes.

9.3 Entrées/Sorties du logiciel

Comme tout autre logiciel un certain nombre de paramètres d'entrées et de sorties caractérise cet outil.

9.3.1 Entrées

Les entrées du logiciel correspondent aux spécifications du réseau à étudier (tension d'alimentation, valeurs des impédance de ligne, transformateurs, charges ...) et aux différents évènements à simuler (instant de démarrage des moteurs, apparition d'un creux de tension)

9.3.1.1 Données du réseau

- Architecture du réseau
 - Structure d'arborescence du réseau
 - Emplacement des différents éléments du réseau
- Données du réseau :
 - Caractéristiques de la tension d'alimentation
 - Caractéristiques des transformateurs
 - Impédances de ligne.
- Caractéristiques des charges :
 - à partir des données catalogue
 - ou des plaques signalétiques des machines statiques et tournantes
 - Caractéristiques des protections et leur emplacement

9.3.1.2 Scenarii d'évènements

- Scenarii de défauts :
 - Défaillance source
 - Court circuit
 - Démarrage de gros moteur...

9.3.2 Sorties

Afin d'exploiter au mieux les résultats de la simulation, il serait utile d'avoir en sortie un certain nombre d'informations concernant l'état de fonctionnement du réseau :

- La répartition de puissance active et réactive aux différents points de l'installation : « Load Flow »
- La propagation de la tension
- Le comportement statique et dynamique des charges

- L'état des protections dans les réseaux
- Une carte de sensibilité qui indiquerait l'emplacement des nœuds les plus sensibles de l'installation. La sensibilité d'un nœud dépend principalement de la puissance de court circuit correspondante.

9.4 Quel futur pour le logiciel ?

Ce proto logiciel sera une brique pour le développement futur d'un logiciel complet axé sur la qualité de l'énergie en général.

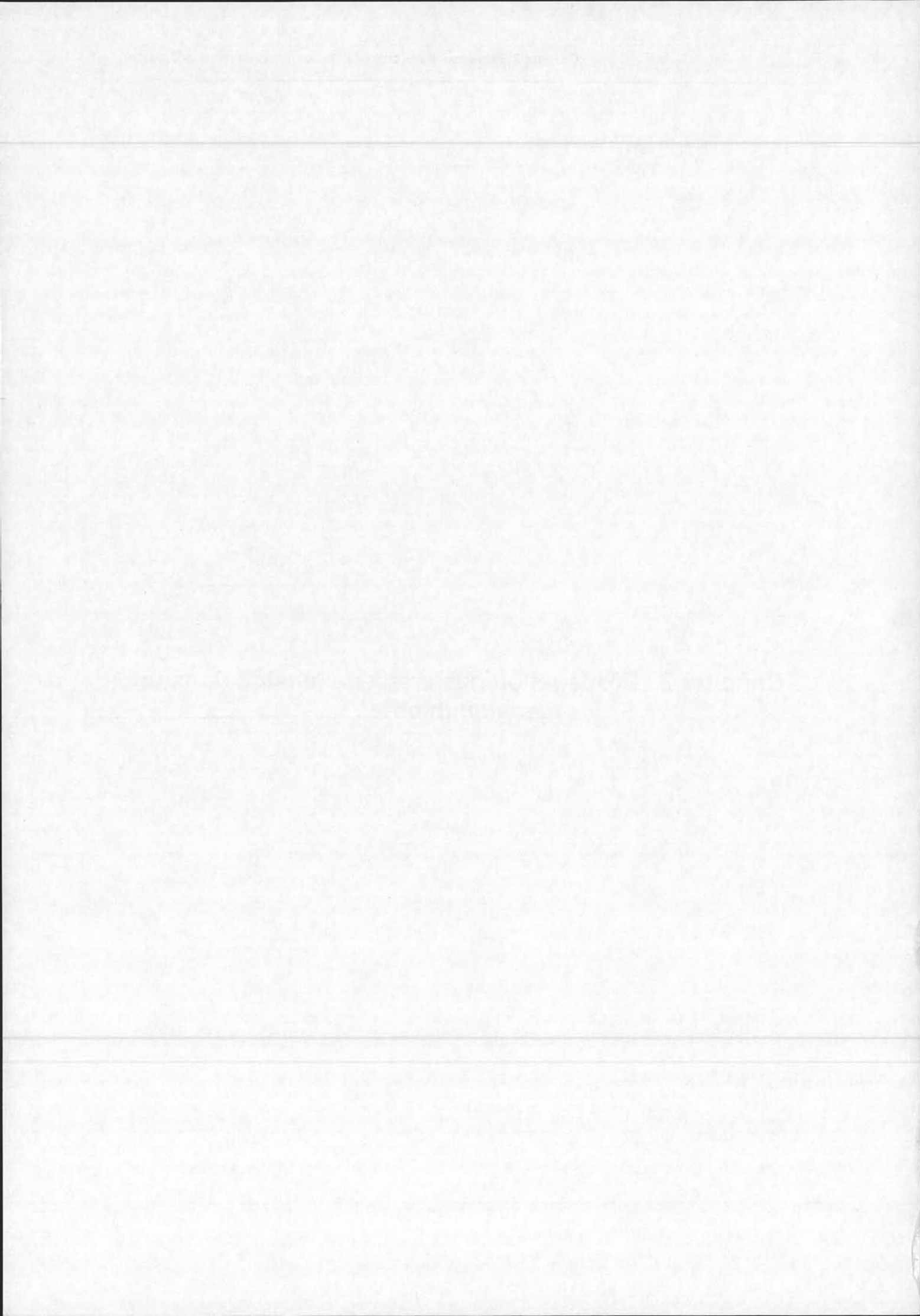
Ce logiciel sera ouvert à des modifications, subira un interfaçage homme-machine à des fins de convivialité et enfin restera ouvert à un enrichissement continu de la bibliothèque de composants et des services à proposer.

10 Conclusion

Du fait de la multiplication des sources de perturbations qui affectent les réseaux électriques, la qualité de la tension a tendance à se dégrader entraînant des conséquences matérielles et économiques. Ces phénomènes deviennent de plus en plus préoccupant surtout après l'ouverture du marché de l'électricité à la concurrence.

Les creux de tensions et les coupures brèves sont liées principalement à des phénomènes aléatoires qui apparaissent sur le réseau du distributeur d'où la difficulté de planification et en conséquence l'impossibilité de garantir le zéro défaut à un client. Il va de soit que des études de type pré diagnostic vont dans le sens d'une meilleure caractérisation et prévention d'incidents liés aux creux. Des études doivent donc être menées entre le client industriel et le distributeur afin de définir la solution optimale à mettre en œuvre pour adapter les installations. C'est dans cette optique que s'inscrivent les travaux de cette thèse.

**Chapitre 2 : Propagation des creux de tension dans un
réseau industriel.**



Chapitre 2 : Propagation des creux de tension dans un réseau industriel.

1	Introduction.....	42
2	Schéma de base de l'installation.....	42
2.1	Les tensions aux nœuds.....	43
2.2	Les lignes	43
2.3	Les transformateurs de tension	43
2.4	Les charges.....	44
3	Mise en équation.....	45
3.1	Equation récurrente entre deux tensions consécutives.....	45
3.2	Conditions de fonctionnement pour que V_{i+1} existe.....	46
3.3	Interprétation de l'équation [1].....	47
4	Simplification de l'équation récurrente.....	48
4.1	Hypothèse sur la chute de tension et conséquences.....	48
4.2	Formule de récurrence	50
4.3	Conclusion	51
5	Algorithme de calcul du plan de tension.....	52
5.1	Entrées de l'algorithme.....	52
5.2	Principe de l'algorithme	53
5.3	Cas particulier du démarrage de machines à induction.....	54
5.4	Organigramme de l'algorithme de calcul.....	55
6	Validation des résultats sur SABER	56
6.1	Première installation	56
6.2	Deuxième installation	57
6.3	Troisième installation.....	58
6.4	Quatrième installation.....	59
7	Synthèse et conclusion.....	59



1 Introduction

Le Chapitre 2 présente une mise en équation de la propagation des creux de tension dans les réseaux industriels. Cette étude est établie dans le cas d'un système triphasé équilibré direct. Un algorithme de répartition de puissance (load flow) permettant de calculer la répartition de la tension en fonction de l'appel de puissance, est élaboré et validé.

Ce chapitre expose les données nécessaires pour l'élaboration de l'algorithme, dans un premier temps la structure du réseau est présentée, ainsi que les données nécessaires concernant les éléments du réseau (lignes, transformateurs, charges). Dans un second temps, la mise en équation du « load flow » est exposée ainsi qu'une étude de validation de l'algorithme de calcul à partir du logiciel de simulation SABER.

2 Schéma de base de l'installation

La structure de base qui servira de brique élémentaire à la modélisation est représentée à la figure 1: Le système étant ici supposé équilibré, cette représentation est équivalente monophasée.

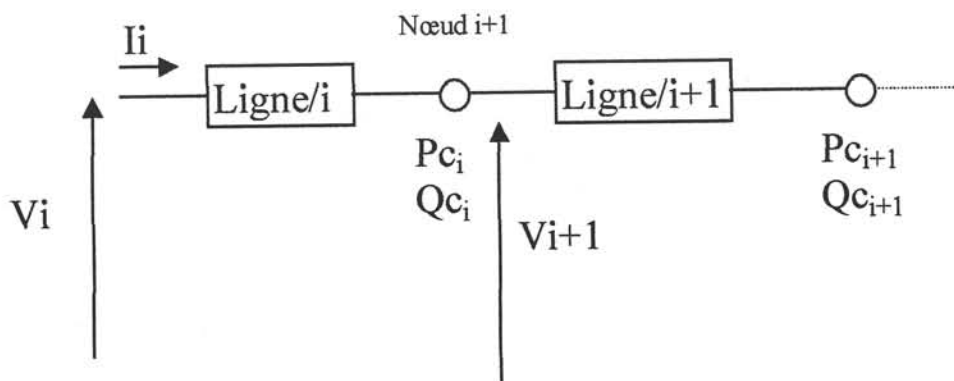


Figure 1: Schéma de la structure de base

Ce choix est motivé par le fait que le réseau industriel est de type radial ou arborescent, cette manière de modéliser les structures de base facilitera ultérieurement leur assemblage en vue d'une modélisation globale qui comprendra :

- Les tensions aux différents nœuds y compris au nœud source
- Les lignes
- Les transformateurs de tension
- Les charges

2.1 Les tensions aux nœuds

Les V_i représentent les valeurs efficaces de la tension simple aux différents nœuds (grandeurs à déterminer). Nous rappelons à cet effet que nous considérons un réseau équilibré.

Pour $i=1$, la tension U_1 représente la valeur efficace de la tension d'alimentation de l'installation. Seule cette dernière valeur est a priori connue.

2.2 Les lignes

La ligne entre les nœuds i et $i+1$ est la ligne i .

La ligne i est représentée par la résistance de ligne R_i modélisant les pertes joules dans la ligne et l'inductance de ligne L_i modélisant les pertes réactives.

La première ligne représente non seulement l'impédance de ligne Z_i mais aussi l'impédance image de la puissance de court circuit au nœud source.

2.3 Les transformateurs de tension

Le modèle de transformateur envisagé est le modèle classique décrit ci dessous :

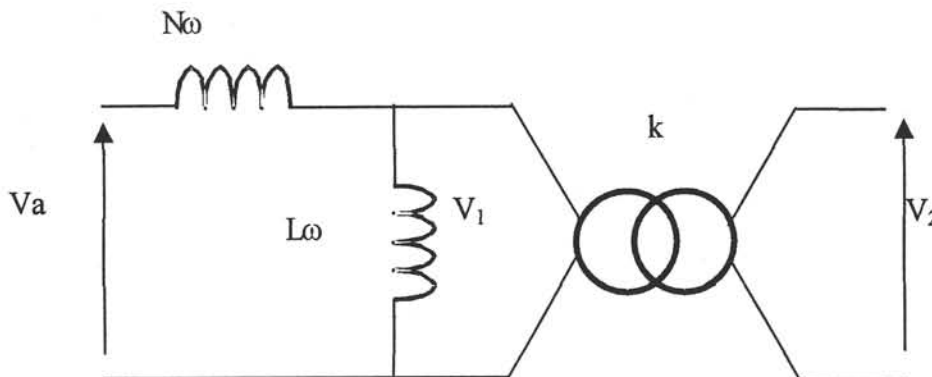


Figure 2: Modèle simplifié de transformateur

N_0 représente l'inductance de fuite ramenée au primaire du transformateur.

L_ω l'inductance de magnétisation.

La résistance du transformateur ramenée au primaire n'est pas représentée, car sa valeur est négligeable par rapport à l'inductance de fuite ; nous sommes bien sûr dans le cas de transformateurs de distribution. De même, la saturation dans le transformateur n'est pas prise en compte. D'où le schéma simplifié précédent.

Les données nécessaires pour déterminer les paramètres du transformateur sont les suivantes :

V_n : tension simple nominale

K : rapport de transformation

u_{cc} : tension de court circuit réduite (en %)

S_n : puissance nominale apparente

$$U_{cc} = u_{cc} * V_{In} = Nw * I_{In}$$

$$\text{Or } I_{In} = \frac{S_n}{3V_{In}} = \frac{S_n}{\sqrt{3}U_{In}}$$

$$Nw = \frac{U_{cc}}{I_{In}} = \frac{u_{cc} * V_{In}}{\frac{S_n}{3V_{In}}} = \frac{u_{cc} * 3V_{In}^2}{S_n}$$

$$\text{Où } N(\omega) = u_{cc} * \frac{U_n^2}{S_n}$$

2.4 Les charges

Les charges sont modélisées par leur puissance active P_{ci} et réactive Q_{ci} absorbées.

Au nœud $i+1$, se trouve la $i^{\text{ème}}$ charge qui présente une puissance apparente $S_{ci} = \sqrt{P_{ci}^2 + Q_{ci}^2}$.

Les puissances des différentes charges peuvent évoluer en fonction de la tension qui leur est appliquée. C'est le cas typique d'un moteur asynchrone qui constitue la principale charge des réseaux industriels. Par exemple, pour un moteur asynchrone la variation de sa puissance active et réactive absorbée en fonction de la tension à ses bornes est de la forme suivante (Figures 4 et 5)

Par ailleurs, L'appel de puissance est l'une des causes les plus importantes dans la génération de creux. D'où l'intérêt de mettre en évidence l'appel de puissance des différentes charges connectées au réseau.

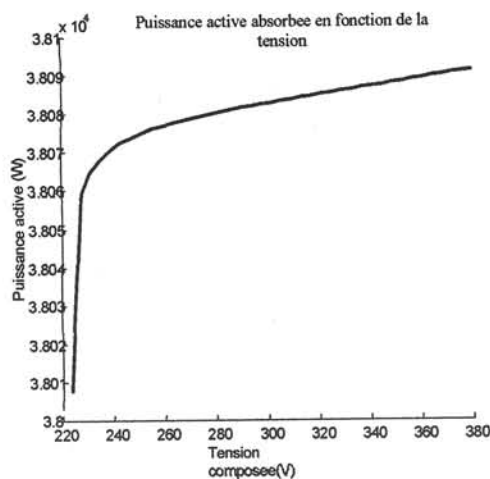


Figure 3: Puissance active en fonction de la tension d'alimentation

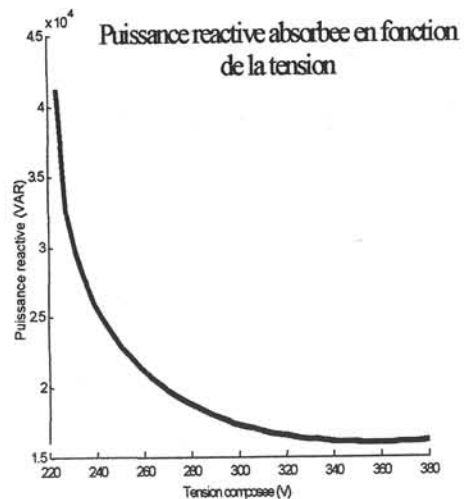


Figure 4: Puissance réactive en fonction de la tension d'alimentation

3 Mise en équation

En considérant le réseau triphasé équilibré, le schéma de la structure de base de la figure 1 correspond à la représentation monophasée étoile équivalente dont le diagramme vectoriel est donné ci dessous.

Le diagramme vectoriel est donné à la figure 6, en s'appuyant sur cette figure et après un calcul élémentaire, on établira une relation de récurrence entre les tensions de deux nœuds successifs.

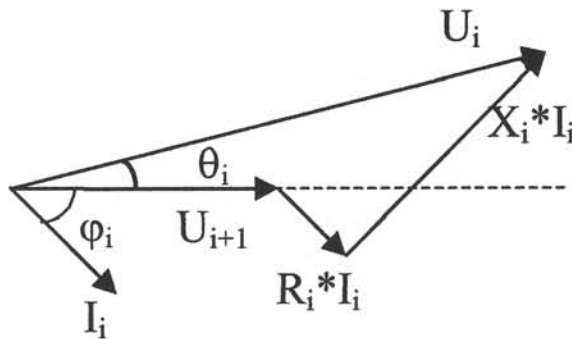


Figure 5: Diagramme vectoriel correspondant à la structure élémentaire de la figure 1

3.1 Equation récurrente entre deux tensions consécutives

La récurrence citée ci dessus s'exprime pour les modules par la relation de l'équation 1

$$U_{i+1} = \sqrt{\frac{A_i + \sqrt{B_i}}{2}} \quad \text{Équation 1}$$

Avec

$$A_i = U_i^2 - 2(R_i P_i + X_i Q_i)$$

et

$$B_i = (U_i^2 - 2(R_i P_i + X_i Q_i))^2 - 4(Z_i S_i)^2$$

P_i et Q_i représentent les puissances totales active et réactive absorbées au nœud $(i+1)$, d'où la sommation suivante :

$$P_i = \sum_{k=i}^{N-1} P_{ck}$$

$$Q_i = \sum_{k=i}^{N-1} Q_{ck} \quad \sum_{k=i}^{N-1} Q_{ck}$$

Où N est le nombre total de nœuds.

En ce qui concerne les déphasages, ils sont donnés par la relation (2)

$$\cos(\theta_{i+1}) = \frac{U_i^2 + R_i P_i + X_i Q_i}{U_i U_{i+1}} \quad \text{Équation 2}$$

Où θ_i est l'angle de déphasage entre les tensions V_i et V_{i+1}

(**N.B.** dans ce calcul $P_i = V_i I_i \cos(\varphi_i)$ et $Q_i = V_i I_i \sin(\varphi_i)$)

avec

$$Z_i = \sqrt{R_i^2 + X_i^2}$$

et

$$S_i = \sqrt{P_i^2 + Q_i^2}$$

3.2 Conditions de fonctionnement pour que V_{i+1} existe

Le fait que l'expression du module de la tension V_{i+1} ne soit pas réelle implique la non existence de solution au calcul de répartition de charges ce qui peut s'interpréter comme une impossibilité au poste source de fournir la puissance exigée par les différentes charges.

D'après le calcul précédent : Pour que V_{i+1} existe il faut et il suffit que B_i et $A_i + \sqrt{B_i}$ soient positifs.

$$\text{Condition : } B_i = (V_i^2 - 2(R_i P_i + X_i Q_i))^2 - 4(Z_i S_i)^2 > 0$$

$$\Rightarrow (V_i^2 - 2(R_i P_i + X_i Q_i))^2 > 4(Z_i S_i)^2$$

$$\Rightarrow |V_i^2 - 2(R_i P_i + X_i Q_i)| > 2(Z_i S_i)$$

$$\text{si } A_i > 0 \Rightarrow V_i^2 > 2(R_i P_i + X_i Q_i)$$

$$\Rightarrow V_i > \sqrt{2(R_i P_i + X_i Q_i) + 2(Z_i S_i)}$$

$$\text{si } A_i < 0 \Rightarrow V_i^2 < 2(R_i P_i + X_i Q_i)$$

$$\Rightarrow 2(R_i P_i + X_i Q_i) - V_i^2 > 2(Z_i S_i)$$

$$\Rightarrow V_i^2 < 2(R_i P_i + X_i Q_i) - 2(Z_i S_i)$$

Le cas où $A_i > 0$ est le cas le plus réaliste, l'autre cas ($A_i < 0$) correspondrait à des valeurs faibles de la tension.

Donc on définit $V_{i \min} = \sqrt{2(R_i P_i + X_i Q_i) + 2(Z_i S_i)}$. **Équation 3**

Le calcul précédent nous amène à conclure que le calcul de load flow n'est possible que lorsque le réseau permet le transit de puissance donné.

3.3 Interprétation de l'équation [1]

L'expression de la tension à un nœud donné (Eq. 1), que nous redonnons ci dessous, amène à des remarques plus ou moins triviales mais qui ont le mérite d'en montrer la pertinence.

$$U_{i+1} = \sqrt{\frac{A_i + \sqrt{B_i}}{2}}$$

- ***Influence de l'appel de puissance***

Pour une tension réseau et des impédances de ligne données, on vérifie que la tension en un nœud du réseau évolue en inverse des puissances consommées,

- ***Influence des pertes lignes***

Pour une tension réseau et une puissance consommée données, on vérifie que la tension évolue en inverse des impédances de ligne.

- ***Sens de propagation de la variation de tension du nœud source***

On vérifie aisément par la récurrence que la propagation d'un creux sur la tension source se fait d'amont vers l'aval.

Un programme sur MATLAB a été développé afin d'exploiter la loi de propagation des creux de tension en fonction de l'amplitude de la tension réseau, des puissances absorbées ainsi que des impédances de lignes.

4 Simplification de l'équation récurrente

Nous proposons ici une simplification de l'expression (Equation. 1) afin de pouvoir en tirer quelques conclusions directement interprétables pour la loi de propagation des creux.

Rappelons les deux relations :

$$U_{i+1} = \sqrt{\frac{A_i + \sqrt{B_i}}{2}} \quad \text{Équation 4}$$

$$\cos(\theta_{i+1}) = \frac{U_i^2 + R_i P_i + X_i Q_i}{U_i U_{i+1}} \quad \text{Équation 5}$$

Avec

$$A_i = U_i^2 - 2(R_i P_i + X_i Q_i)$$

et

$$B_i = (U_i^2 - 2(R_i P_i + X_i Q_i))^2 - (2Z_i S_i)^2$$

Les grandeurs utilisées dans ces formules sont des grandeurs efficaces

4.1 Hypothèse sur la chute de tension et conséquences

Supposons que le terme 4 ($Z_i S_i$) soit négligeable devant U_i^2 .

$$R_i P_i + X_i Q_i < 2 Z_i S_i \ll U_i^2$$

$$\Rightarrow 2(R_i P_i + X_i Q_i) < 4 Z_i S_i \ll U_i^2$$

En mettant U_i^2 en facteur dans B_i devient :

$$B_i = U_i^4 \left[\left(1 - \frac{2(R_i P_i + X_i Q_i)}{U_i^2} \right)^2 - \left(\frac{2Z_i S_i}{U_i^2} \right)^2 \right]$$

En regardant le terme entre crochet : $\frac{2(R_i P_i + X_i Q_i)}{U_i^2}$ et $\left(\frac{2Z_i S_i}{U_i^2} \right)^2 \ll 1$

$$\text{Or } (1-\varepsilon)^2 \approx 1-2\varepsilon$$

Donc

$$\left(1 - \frac{2(R_i P_i + X_i Q_i)}{U_i^2}\right)^2 = A_i^2 \approx 1 - \frac{4(R_i P_i + X_i Q_i)}{U_i^2}$$

et

$\left(\frac{2Z_i S_i}{U_i^2}\right)^2$ est négligeable car c'est un infiniment petit du second ordre (élevé au carré).

En tenant compte de ces simplifications l'expression de B_i devient :

$$B_i = U_i^4 \left(1 - \frac{4(R_i P_i + X_i Q_i)}{U_i^2}\right) = A_i^2.$$

$$\text{Or } U_{i+1} = \sqrt{\frac{A_i + \sqrt{B_i}}{2}}$$

$$\Rightarrow U_{i+1} = \sqrt{\frac{A_i + A_i}{2}} = \sqrt{A_i}$$

$$U_{i+1} = U_i \left(1 - 2 \frac{(R_i P_i + X_i Q_i)}{U_i^2}\right)^{\frac{1}{2}}$$

$$\Rightarrow U_{i+1} = U_i \left(1 - \frac{(R_i P_i + X_i Q_i)}{U_i^2}\right)$$

$$\Rightarrow \frac{U_i - U_{i+1}}{U_i} = \frac{(R_i P_i + X_i Q_i)}{U_i^2} = \frac{\Delta U_{i+1}}{U_i} \quad \text{Équation 6}$$

Cette forme (Eq.6) rappelle l'expression la plus courante dans la littérature. Comme par exemple dans le Guide de l'ingénierie électrique [1] où la variation de puissance et la variation de tension s'écrit dans le cas monophasé $\frac{\Delta V}{V} \approx \frac{(R\Delta P + X\Delta Q)}{V^2}$ lorsque les

phénomènes transitoires sont éliminés. Et en triphasé équilibré, la même relation est utilisable en désignant par P et Q les puissances actives et réactives triphasés : $\frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta U}{U} \approx \frac{(R\Delta P + X\Delta Q)}{U^2}$.

Et cette formule est applicable néanmoins dans la quasi-totalité des chutes de tension dans les réseaux industriels. On peut estimer sa précision à quelques pour cent :

$$\frac{\Delta V}{V} \approx \frac{(\Delta Q + \frac{1}{\text{tg}\Psi} \Delta P)}{V^2/X} \text{ avec}$$

$\frac{\Delta V}{V}$: variation relative de tension en %

V^2 : carré de la tension au point où l'on calcule la variation de tension.

ΔP : variation de puissance active

ΔQ : variation de puissance réactive

$\text{tg}\Psi = \frac{X}{R}$: coefficient de qualité du réseau à 50 Hz

De ce calcul on peut également affirmer que la diminution du rapport $\frac{\Delta V}{V}$ vise donc :

- soit à diminuer R et X, c'est à dire augmenter la puissance de court circuit au niveau du point de mesure.
- Soit à diminuer ΔP et ΔQ ; dans la plupart des cas, cela revient à atténuer la variation de la puissance réactive, car dans un réseau de bonne qualité, $\text{tg}\Psi$ étant grand, le terme $\frac{\Delta P}{\text{tg}\Psi}$ est négligeable, ce qui permet une simplification supplémentaire : $\frac{\Delta V}{V} \approx \frac{\Delta Q}{S_{cc}}$ où S_{cc} est la puissance de court circuit du réseau d'alimentation.

4.2 Formule de récurrence

En revenant à la forme initiale de l'équation 6 , il est possible de formuler une récurrence entre les tensions des différents nœuds U_i et la tension du nœud source $U_{réseau}=U_1$.

$$U_{i+1}^2 = A_i \quad \text{Équation 7}$$

$$A_1 = U_1^2 - 2(R_1 P_1 + X_1 Q_1)$$

$$A_2 = U_2^2 - 2(R_2 P_2 + X_2 Q_2) = A_1 - 2(R_2 P_2 + X_2 Q_2) = U_1^2 - 2(R_1 P_1 + X_1 Q_1) - 2(R_2 P_2 + X_2 Q_2)$$

$$U_{n+1}^2 = A_n = U_1^2 - 2(R_1 P_1 + X_1 Q_1) - 2(R_2 P_2 + X_2 Q_2) - 2(R_3 P_3 + X_3 Q_3) - \dots - 2(R_n P_n + X_n Q_n)$$

Équation 8

Les P_i et Q_i représentent toute la puissance absorbée à partir du nœud $i+1$, essayons de reformuler la récurrence en faisant intervenir les puissances des différentes charges séparément :

Pour un réseau de N nœuds :

$$P_i = \sum_{k=i+1}^{N-1} P_{C_k}$$

et

Équation 9

$$Q_i = \sum_{k=i+1}^{N-1} Q_{C_k}$$

En plaçant (Eq.9) dans (Eq.8) et en mettant les P_{ck} et Q_{ck} en facteur, l'équation (Eq.8) devient :

$$U_{n+1}^2 = U_1^2 - 2 \left\{ \left[R_1 P_{c1} + (R_1 + R_2) P_{c2} + \dots + (R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_{n-1}) P_{c(n-1)} + (R_1 + R_2 + \dots + R_n) (P_{c(n)} + P_{c(n+1)} + \dots + P_{c(N-1)}) \right] \right. \\ \left. + \left[X_1 Q_{c1} + (X_1 + X_2) Q_{c2} + \dots + (X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_{n-1}) Q_{c(n-1)} + (X_1 + X_2 + \dots + X_n) (Q_{c(n)} + Q_{c(n+1)} + \dots + Q_{c(N-1)}) \right] \right\}$$

Équation 10

C'est le terme entre accolades { } qui contribue à la chute de tension Ce terme dépend uniquement des puissances des charges et des impédances de ligne.

En observant les coefficients qui multiplient les puissances absorbées par les différentes charges, les charges les plus en amont ont leur puissance multipliée par un facteur inférieur à celles des charges situées en aval.

Par exemple la charge située au nœud 6, a une puissance active P_{c5} et réactive Q_{c5} , pour le calcul des tensions amonts et avales, cette charge influe sur ces tensions par les termes :

$(R_1)P_{c5}$ et $(X_1)Q_{c5}$	dans le calcul de U_2
$(R_1+R_2)P_{c5}$ et $(X_1+X_2)Q_{c5}$	dans le calcul de U_3
$(R_1+R_2+R_3)P_{c5}$ et $(X_1+X_2+X_3)Q_{c5}$	dans le calcul de U_4
$(R_1+R_2+R_3+R_4)P_{c5}$ et $(X_1+X_2+X_3+X_4)Q_{c5}$	dans le calcul de U_5
$(R_1+R_2+R_3+R_4+R_5)P_{c5}$ et $(X_1+X_2+X_3+X_4+X_5)Q_{c5}$	dans le calcul de U_6 jusqu'à U_N

De même une charge placée au nœud 3, influe sur le calcul des tensions amonts et avales par les termes :

$(R_1)P_{c2}$ et $(X_1)Q_{c2}$	dans le calcul de U_2
$(R_1+R_2)P_{c2}$ et $(X_1+X_2)Q_{c2}$	dans le calcul de U_3 jusqu'à U_N

4.3 Conclusion

D'après le calcul du § II.6.2 , et afin de protéger au mieux le réseau des perturbations, il serait intéressant de placer les charges à fortes variations de puissances le plus en amont pour perturber le réseau le moins possible.

Et d'autre part, il serait aussi utile de placer les charges sensibles le plus en amont du réseau, car une éventuelle variation de puissance avale aura l'effet le plus faible sur les nœuds les plus en amont, en effet, pour le calcul de U_i les puissances sont multipliées par la somme des impédances de ligne en amont : $R_1+\dots+R_i$. et $X_1+\dots+X_i$.

La puissance de court circuit au nœud i étant définie comme suit :

$$P_{cc}(i) = \frac{U_r^2}{\sum_{k=1}^{i-1} Z_k}$$

source.

Une charge située au nœud i :

- *affecte les tensions avales proportionnellement au terme $\frac{U_r^2}{P_{cc}(i)}$ et aux puissances absorbées par la charge.*
- *la tension à ses bornes est affectée par le reste du réseau proportionnellement au terme $\frac{U_r^2}{P_{cc}(i)}$.*

D'où l'intérêt

- d'avoir un réseau avec une importante puissance de court circuit
- de placer les charges les plus perturbatrices et les plus sensibles en amont de l'installation ou aux nœuds où la puissance de court circuit est la plus importante possible.

5 Algorithme de calcul du plan de tension

5.1 Entrées de l'algorithme

Le réseau doit être défini selon les caractéristiques de la figure (2.1), les données sont les suivantes: :

- Amplitude de la tension source
- Puissance de court circuit de la source
- Impédance des différentes lignes
- Valeurs des puissances actives et réactives nominales absorbées par les différentes charges.
- Nature des charges aux différents nœuds : bancs de condensateurs, moteurs asynchrones, moteurs synchrones...

5.2 Principe de l'algorithme

Le principe général du calcul de la répartition de la tension à partir des formules (2.1) et (2.2) est basé sur le principe de la récursivité

1. Un premier calcul fait appel aux équations 1 et 2 où les puissances utilisées sont les puissances nominales absorbées par les différentes charges
2. Le déphasage entre les différentes tensions est calculé à partir de l'équation 2
3. Les puissances absorbées par les charges sont recalculées en fonction de la tension à leurs bornes
4. A partir de ces nouvelles valeurs de puissances, les tensions sont alors recalculées
5. Les étapes 3 et 4 seront refaites successivement jusqu'à convergence de la valeur de la tension.
6. Le déphasage des différentes tensions est alors calculé à partir de l'équation 2
7. Les puissances utilisées jusqu'à présent ne tiennent pas compte des puissances dissipées en ligne, qui ne peuvent être qu'estimées. A cet effet, à partir des valeurs de la tension déjà définies les pertes en ligne actives et réactives sont estimées comme suit :

La ligne est modélisée par une impédance constituée d'une résistance en série avec une inductance. On définit \vec{V}_i par la relation suivante : $\vec{V}_i = \vec{V}_i - \vec{V}_{i+1}$. \vec{V}_i est la chute de la tension aux bornes de la ligne i.

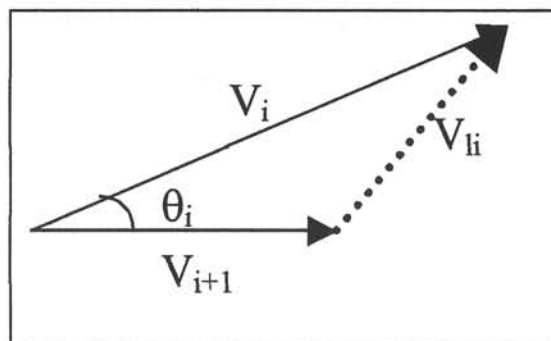


Figure 6 : Chute de tension V_{li} aux bornes de la ligne i

Calcul de l'amplitude de V_{li}

$$V_{li} = \sqrt{V_i^2 - V_{i+1}^2 - 2V_i V_{i+1} \cos(\theta_i)}$$

Calcul des pertes actives et réactives dans la ligne (i)

$$P_{li}=3 \cdot R_i \cdot \left(\frac{V_{li}}{Z_i}\right)^2$$

$$Q_{li}=3 \cdot X_i \cdot \left(\frac{V_{li}}{Z_i}\right)^2$$

Ces pertes en lignes sont ajoutées aux puissances dissipées au niveau des différents nœuds.

$$P_i = P_i + \sum_{k=i+1}^{N-1} P_{l_k}$$

et

$$Q_i = Q_i + \sum_{k=i+1}^{N-1} Q_{l_k}$$

8. A partir de ces nouvelles valeurs de puissances, les tensions en chaque nœud sont alors recalculées
9. Les étapes 7 et 8 seront refaites successivement jusqu'à convergence de la valeur de la tension.
10. Les déphasages des différentes tensions sont calculés à partir de la formule (Equation 2)
11. Et finalement les étapes 3 et 4 seront refaites successivement jusqu'à une dernière convergence de la tension.
12. Les déphasages des différentes tensions sont alors recalculés à partir de la formule (Equation 2)

5.3 Cas particulier du démarrage de machines à induction

Quatre types de démarrage de machine asynchrone seront considérés:

- Démarrage direct

$$\frac{I_d}{I_n} = 5.6 \text{ et } \cos(\varphi_d) = 0.2$$

- Démarrage avec autotransformateur

$$\frac{I_d}{I_n} = 5.6 \text{ et } \cos(\varphi_d) = 0.2$$

- Démarrage avec rhéostat statorique

$$\frac{I_d}{I_n} = 5.6 \text{ et } \cos(\varphi_d) = 0.2$$

- Démarrage d'un moteur à rotor bobiné muni d'un rhéostat au rotor

$$\frac{I_d}{I_n} = 1.5 \text{ et } \cos(\varphi_d) = 0.7$$

La démarche du calcul est identique aux étapes déjà explicitées : étape (1) à (12). Sauf que dans la première étape les premières valeurs de la tension sont déterminées à partir des

puissances de démarrage pour les machines en phase de démarrage en lieu des puissances nominales.

5.4 Organigramme de l'algorithme de calcul

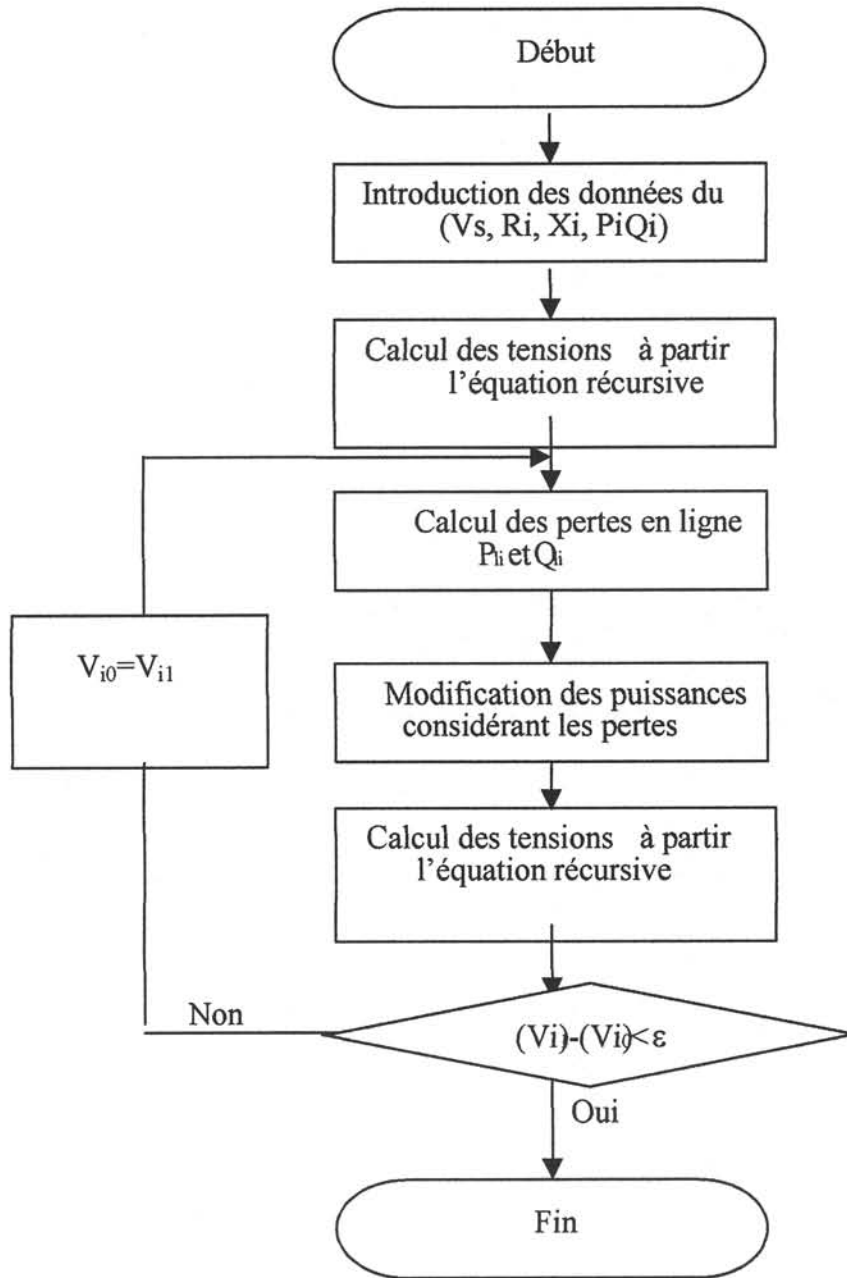


Figure 7 : Organigramme de l'algorithme de calcul

6 Validation des résultats sur SABER

Plusieurs cas de réseau ont été simulés sur SABER pour corroborer notre approche : Saber est un logiciel de simulation de réseaux électriques, et présente une librairie assez large des composants d'un réseau, Toutefois nous n'utiliserons qu'une source de tension et des impédances, pour modéliser l'ensemble réseau-charges.

6.1 Première installation

Uefficace=20kV

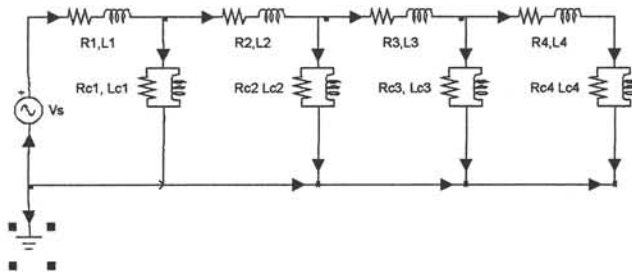


Figure 8 : Schéma de l'installation 1

I	Pi	Qi	Ri	Li
1	10 MW	3.5 MVar	1 Ω	5mH
2	10 MW	3.5 MVar	1 Ω	5mH
3	10 MW	3.5 MVar	1 Ω	5mH
4	5 MW	1.75 MVar	1 Ω	5mH

Tension	SABER	Programme	Écart en %
U1	28160 V	28284 V	0.44
U2	24901 V	25303 V	1.6%
U3	22603 V	23166 V	2.5%
U4	21997 V	21889 V	0.4%
U5	21881 V	21470 V	2.1%

θ	SABER	Programme	Différence	Écart en %
θ_1	0	0	0	0%
θ_2	4.74°	4.614°	0.126°	2%
θ_3	8.6°	8.34°	0.26°	3%
θ_4	11.9°	10.78°	1.12°	9%
θ_5	13°	11.7°	1.3°	10%

6.2 Deuxième installation

Uefficace=20 KV

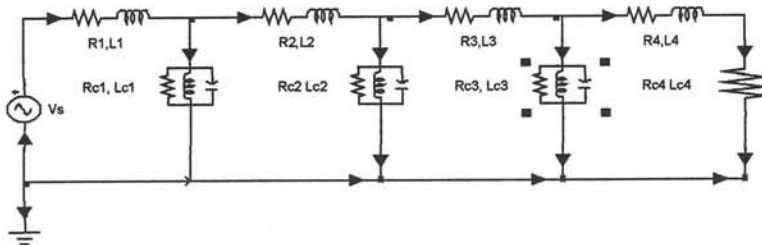


Figure 9 : Schéma de l'installation 2

I	Pi	Qi	Ri	Li
1	4 MW	3.5 MVar	1 Ω	5mH
2	10 MW	3.5 MVar	1 Ω	5mH
3	400 kW	6.367 MVar	1 Ω	5mH
4	400 kW	0	1 Ω	5mH

Tension	SABER	Programme	Écart en %
U1	28.252kV	28.284kV	0.11%
U2	26.000kV	26.170kV	0.6%
U3	24.400kV	24.584kV	0.75%
U4	23.840kV	23.936kV	0.4%
U5	23.282kV	23.912kV	2.7%

6.3 Troisième installation

Uefficace=20 KV

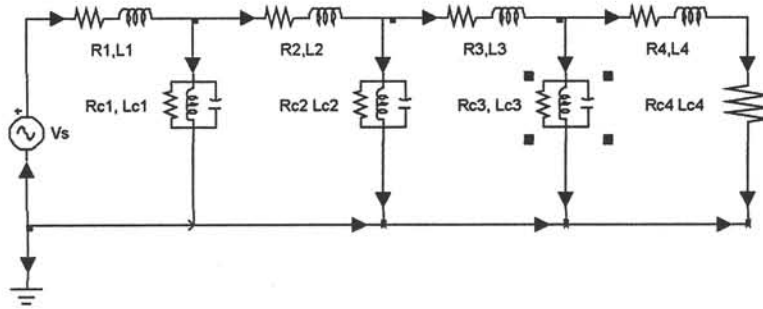


Figure 10 : Schéma de l'installation 3

I	Pi	Qi	Ri	Li
1	4 MW	3.5 MVar	0.1 Ω	0.5mH
2	10 MW	3.5 MVar	0.1 Ω	0.5mH
3	400 kW	6.367 MVar	1 Ω	5mH
4	400 kW	0	1 Ω	5mH

Tension	SABER	Programme	Écart en %
U1	28.085kV	28.284kV	0.7%
U2	27.829kV	28.040kV	0.7 %
U3	27.660kV	27.860kV	0.7 %
U4	26.800kV	27.125kV	1.2 %
U5	26.600kV	27.098kV	1.8 %

6.4 Quatrième installation

Urefficace=20 KV

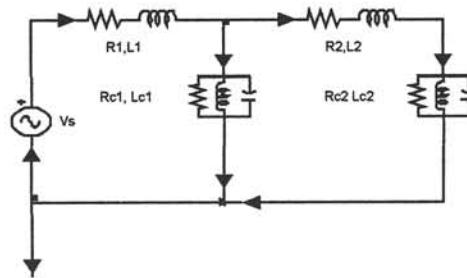


Figure 11: Schéma de l'installation

I	Pi	Qi	Ri	Li
1	10 MW	3.5 MVAR	1 Ω	5mH
2	10 MW	3.5 MVAR	1 Ω	5mH

Tension	SABER	Programme	Écart en %
U1	28.258kV	28.284kV	0.1%
U2	26.165kV	26.032kV	0.5 %
U3	25.238kV	24.761kV	1.8 %

7 Synthèse et conclusion

Les perturbations dues aux grandes variations des puissances appelées au sein d'une installation, se traduisent par une génération de creux de tension.

Les niveaux de ces perturbations tout au long de l'installation sont fonctions de la puissance de court circuit en chaque nœud, cette dernière étant le rapport entre le carré de la tension d'alimentation et l'impédance de la ligne qui sépare le nœud considéré du nœud source.

Une charge située en un nœud de grande puissance de court circuit :

- est plus immunisée vis à vis des perturbations provenant de grandes variations de puissance qui peuvent affecter l'amplitude de sa tension.
- ses variations brusques de puissances affectent moins le reste de l'installation.

L'algorithme proposé constitue une étude statique du comportement de l'ensemble charge-réseau. Et donc ne permet d'avoir qu'une idée assez générale du comportement du réseau. Néanmoins il permet de valider l'algorithme de répartition de charges élaboré.

Dans la suite de l'étude, l'aspect dynamique sera pris en compte plus spécialement, notamment dans la modélisation des machines à induction.

Chapitre 3 : Modélisation de la machine à induction

Chapitre 3 : Modélisation de la machine à induction

CHAPITRE 3 : MODELISATION DE LA MACHINE A INDUCTION.....	60
1 Introduction.....	62
2 Estimation des paramètres de la machine à induction	63
2.1 Principe	63
2.2 Calcul des paramètres	63
2.3 Exemple d'application numérique	67
3 Modélisation statique de la machine à induction.....	68
3.1 Modélisation statique sans effet de peau.....	68
3.2 Modélisation statique de la machine à induction avec effet de peau	69
4 Modélisation dynamique de la machine à induction en régime équilibré.....	76
4.1 Modèle du cinquième ordre	77
4.2 Modèle du troisième ordre	78
4.3 Modèle du second ordre.....	79
4.4 Modèle du premier ordre.....	79
5 Modélisation dynamique de la machine à induction en régime déséquilibré	80
5.1 Composition du système triphasé dans le repère de Park	80
5.2 Calcul des puissances :.....	86
6 Modélisation de la machine à induction dans le cas de coupures dues à une ouverture des protections ($I_{\text{stator}}=0$)	87
6.1 Mise en équation.....	87
6.2 Application numérique.....	89
7 Conclusion	91

1 Introduction

Le Chapitre 3 traite le cas de la machine à induction, principale charge présente dans les réseaux industriels. En effet, elle représente environ 50% de la consommation industrielle d'électricité [13]. L'étude de son comportement vis à vis des creux de tension revêt donc un aspect primordial.

Les modèles de machines à induction sont nombreux ; ils varient selon l'utilisation que l'on veut en faire, la précision demandée ou encore le degré de complexité accepté.

Le logiciel à développer est orienté vers l'étude des réseaux industriels, et dans certains cas les données disponibles sont assez limitées. Ce chapitre débute donc par la description de la méthodologie d'estimation des paramètres d'une machine sur la base de données d'un catalogue constructeur ou commercial. Le modèle statique qui en découle est ensuite présenté. Ce dernier est aussi adapté aux machines industrielles à double cage ou à encoches profondes qui présentent une caractéristique statique particulière.

Viennent ensuite les modèles dynamiques basés sur les paramètres précédemment établis. Le modèle de base est du cinquième ordre et prend en compte les dynamiques électriques statoriques et rotoriques ainsi que mécanique. Les modèles d'ordre inférieur sont construits à partir de simplifications du modèle du 2^{ème} ordre essentiellement basées sur le principe de la séparation des modes, qui permet de négliger certains transitoires électriques.

Les modèles dynamiques sont alors généralisés pour pouvoir décrire le comportement de la machine alimentée par un système de tensions déséquilibré.

Finalement, un modèle spécial est présenté pour l'étude du comportement de la machine après ouverture des protections. Dans ce cas la machine n'est plus alimentée en tension et les modèles précédents ne sont plus valables. Ce nouveau modèle permet notamment de déterminer l'allure de la tension résiduelle induite au stator après ouverture.

Pour conclure, deux remarques :

- à des fins de simulation, tous les modèles présentés sont programmés dans le logiciel Matlab ;
- pour des raisons d'allégement de présentation, les calculs complexes sont détaillés dans les diverses annexes.

2 Estimation des paramètres de la machine à induction

2.1 Principe

Plusieurs techniques d'identification des paramètres de la machine à induction sont proposées dans la littérature. Certaines s'appuient sur les données catalogue et une connaissance générale de la machine à induction. D'autres sont basées sur une étude expérimentale de la machines à induction (à rotor bloqué, à vide, au point nominal) [14]-[15].

Il existe aussi des méthodes basées sur résolution des équations de Maxwell par la méthode des éléments finis [14]. Ceci revient à définir un banc d'essais virtuel. Il est donc possible de réaliser les mêmes essais qu'expérimentalement mais en s'affranchissant des limites électriques, mécaniques, thermiques. D'autre part, on a, par ces méthodes, accès à certaines grandeurs électromagnétiques locales.

Dans le cadre de cette étude, une démarche adaptée à notre problème, est développée. Les équations du modèle identifié sont issues du schéma équivalent par phase et en régime permanent de la machine. D'autre part, les données nécessaires à l'identification sont restreintes au minimum et, surtout, sont extraites des catalogues constructeurs et/ou commerciaux.

2.2 Calcul des paramètres

2.2.1 Rappel du Schéma équivalent de la machine à induction

Le schéma équivalent monophasé étoile de la machine à induction est donné figure 1 pour le régime permanent sinusoïdal équilibré.

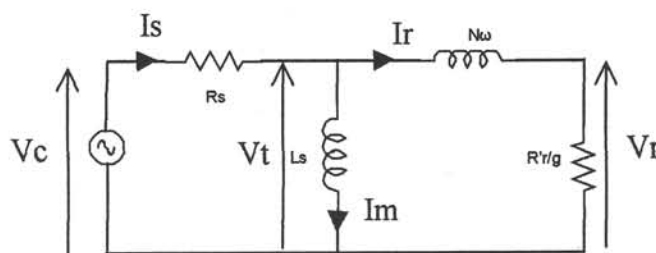


Figure 1: Schéma monophasé étoile équivalent de la machine à induction.

Ce modèle simplifié ne prend pas en compte l'effet de la saturation du circuit magnétique et les pertes fer ...

Les paramètres à déterminer sont :

- R_s : La résistance statorique ;
- N : L'inductance de fuite totale ramenée au rotor ;
- $R'r$: La résistance rotorique ;
- L_s : L'inductance de magnétisation (inductance principale).

Pour mener à bien l'identification, les données catalogue nécessaires sont :

- V_n : La tension simple nominale de la machine à induction
- ω_s : La pulsation statorique nominale.
- I_n : Le courant nominal absorbé par la machine
- P_n : La puissance mécanique nominale
- $\cos(\varphi)$: Le facteur de puissance nominal
- Ω_n : La vitesse mécanique nominale
- K_{cm} : Le rapport entre le couple maximal et le couple nominal
- q : Le nombre de paires de pôles

2.2.2 Calcul du glissement nominal

$$g_n = (\Omega_s - \Omega_n) / \Omega_s.$$

Où Ω_s est la vitesse de synchronisme de la machine à induction en rad/s définie par :

$$\Omega_s = \frac{\omega_s}{q} \text{ rd/s}$$

2.2.3 Détermination de la résistance statorique R_s

La résistance statorique peut être déterminée à partir des pertes joules statoriques :

$$R_s = \frac{P_{js}}{3 \cdot I_n^2}$$

En négligeant les pertes fer de la machine à induction, les pertes joules statoriques se déduisent à partir de la puissance active absorbée (P_a) et de la puissance transmise.

$$P_{js} = P_a - P_{transmise}.$$

Or, la puissance absorbée par le moteur vaut :

$$P_a = 3 \cdot V_n \cdot I_n \cdot \cos(\varphi).$$

D'autre part, on calcule la puissance transmise à partir de la puissance utile et du glissement :

$$P_{transmise} = P_n / (1 - g_n).$$

Ceci revient à sous-estimer la puissance transmise car la puissance transmise est en fait égale à :

$$P_{transmise} = C_{em} \cdot \Omega_n / (1 - g_n) \text{ où } C_{em} \text{ est le couple électromagnétique et non le couple utile.}$$

2.2.4 Calcul de l'inductance de fuite totale N

L'inductance de fuite est déterminée à partir de la valeur du couple maximal C_{max} :

$$N = \frac{3 \cdot q \cdot V_n^2}{2 C_{max} \omega_s}$$

avec:

$$C_{max} = K_{Cm} \cdot C_n.$$

Et :

$$C_n = \frac{P_{transmise}}{\omega_s / q}.$$

2.2.5 Calcul de la résistance rotorique R'_r

Pour calculer la résistance rotorique, on se place au point de fonctionnement nominal, c'est à dire pour $g = g_n$. V_t est la tension aux bornes de l'impédance de magnétisation et V_r la tension aux bornes de R_r . Dans ces conditions :

$$V_r = V_t \cdot \frac{R'_r / g_n}{\sqrt{(R'_r / g_n)^2 + (N \omega_s)^2}}$$

$$\Rightarrow R'_r = \frac{V_r \cdot g_n \cdot N \cdot \omega_s}{\sqrt{V_t^2 - V_r^2}}$$

Il faut donc trouver V_t et V_r .

2.2.5.1 Calcul de la tension aux bornes de l'inductance de magnétisation : V_t

Les puissance active absorbée en aval de l'inductance de magnétisation correspond à la différence entre la puissance active absorbée par la machine et les pertes joules statorique : $P_a - P_{js}$.

La puissance réactive absorbée à partir de ce nœud correspond à toute la puissance réactive absorbée par la machine à induction : $Q_a = 3 V_n I_n \sqrt{1 - \cos(\varphi)}$

L'impédance de la ligne en aval de l'impédance de magnétisation est R_s .

La tension en aval est la tension d'alimentation. En utilisant l'équation 1 du §II.3.1 reliant deux tensions consécutives on trouve :

$$V_t = \sqrt{\frac{\left((V_n^2 - 2 \cdot (R_s \cdot \frac{(P_a - P_{js})}{3}) \right) + \sqrt{\left((2 \cdot (R_s \cdot \frac{(P_a - P_{js})}{3}) - V_n^2 \right)^2 - 4 \cdot (R_s^2 \cdot \left(\frac{(P_a - P_{js})^2}{9} + \frac{Q_a^2}{9} \right))}{2}}$$

Équation 1

2.2.5.2 Calcul de la tension aux bornes de la résistance rotorique : Vr

Au niveau de la résistance rotorique, la puissance active absorbée est la puissance transmise (Pt), et la puissance réactive absorbée est nulle. L'impédance de la ligne en aval est : $N\omega_s$. La tension en aval est : V_t .

A partir de l'équation 1 du § II.3.1 on trouve :

$$V_r = \sqrt{\frac{V_t^2 + \sqrt{V_t^4 - \left(\frac{2}{3}\right)^2 N^2 \omega_s^2 P_t^2}}{2}} \quad \text{Equation 1}$$

2.2.6 Calcul de l'inductance de magnétisation Ls

La puissance réactive absorbée par la machine est la somme des puissances réactives absorbées par l'inductance de fuite N et l'inductance de magnétisation L_s .

$$Q_a = 3 * N * \omega_s * I_r^2 + Q_{L_s} \quad (I_r \text{ étant le courant qui traverse l'inductance de fuite } N)$$

$$\text{avec } Q_{L_s} = 3 * \frac{V_r^2}{L_s \omega_s}$$

$$D'où \quad L_s \omega_s = 3 * \frac{V_r^2}{Q_a - 3 * N * \omega_s * \left(\frac{V_r}{R_r / g_n}\right)^2} \quad \text{Equation 2}$$

2.2.7 Les constantes de temps statorique et rotorique

Les constantes de temps statorique et rotorique, respectivement T_s et T_r , sont définies par :

$$T_s = \frac{L_s}{R_s}$$

Equation 3

$$T_r = \frac{L_s + N}{R_r}$$

2.3 Exemple d'application numérique

Soit le moteur LS 225ST du catalogue LEROY SOMER (1985) . Les données catalogue de ce moteur sont les suivantes :

Tension composée nominale entre phase (V) :	400V
Puissance nominale (kW):	37
Vitesse nominale (t/min) :	1475
Courant nominale (A) :	67
Facteur de puissance nominal :	0.86
Rendement nominal :	92.7
Couple maximal/Couple nominal :	2.6
Moment d'inertie (kg.m ²) :	0.23

A partir des données catalogue précédentes les valeurs des paramètres de la machine asynchrone pour un fonctionnement en régime permanent nominal sont :

Résistance statorique	mΩ	85.1
Résistance rotorique	mΩ	65.8
Inductance de fuite	mH	2.3
Inductance de magnétisation	mH	29.1

Malgré les hypothèses sous-jacentes, le modèle identifié sera utilisé pour des fonctionnements autres que le régime nominal. Ainsi, on ne tiendra pas compte de l'effet de saturation. Par contre, une amélioration sera apportée en intégrant l'effet de peau pour les machines à double cage et à encoches profondes.

3 Modélisation statique de la machine à induction

3.1 Modélisation statique sans effet de peau

Partant des équations relatives au schéma équivalent en régime permanent de la Figure 1, et en négligeant la résistance statorique, il est possible de déterminer l'évolution du couple en fonction du glissement et de la tension d'alimentation :

$$C(g, V_c) = \frac{3 \cdot V_c^2 \cdot \frac{R'_r}{g}}{\omega_s / q \cdot (N \cdot \omega_s)^2 + \left(\frac{R'_r}{g}\right)^2} \quad \text{Equation 4}$$

Du fait de l'hypothèse d'absence de l'effet de peau, la valeur de la résistance rotorique est constante. L'allure du couple (dans le cas du moteur LS 225ST) en fonction du glissement est alors de la forme suivante :

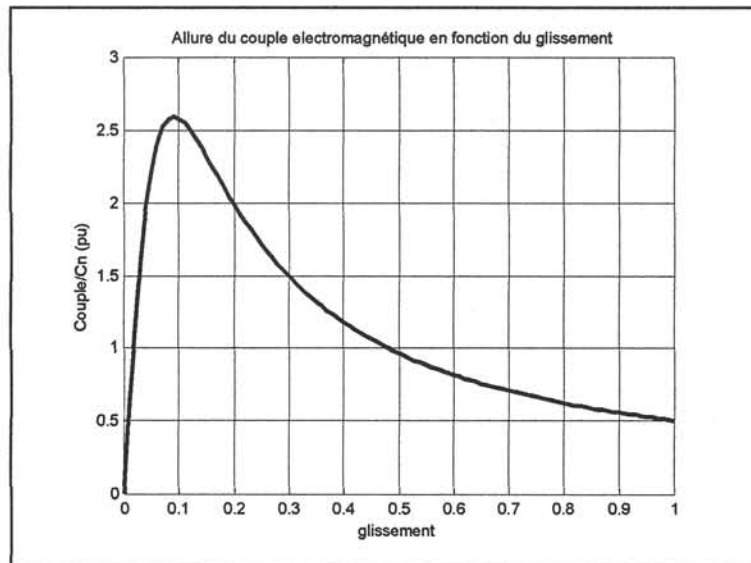


Figure 2: Allure du couple électromagnétique en fonction du glissement (moteur LS 225 ST)

3.2 Modélisation statique de la machine à induction avec effet de peau

La Figure 2 montre que le couple au démarrage ($C_d/C_n=0.5$) est nettement inférieur à la valeur indiquée dans le catalogue ($C_d/C_n=2.4$). En effet, il n'a pas été tenu compte de la double cage. Or, du fait de l'effet de peau qui s'y manifeste, la résistance rotorique décroît depuis le démarrage jusqu'au régime permanent. Sa variation peut atteindre plusieurs centaines de % [13]. Ce phénomène permet d'avoir un couple de démarrage supérieur à celui obtenu avec une résistance rotorique constante. Il faut noter que la valeur de l'inductance de fuite tend à diminuer avec l'effet de peau. Cependant, les variations de l'inductance de fuite ne dépassent pas les 20%, ce qui est négligeable par rapport à la variation de la résistance rotorique. Par conséquent, pour modéliser l'effet de peau, seule une loi de variation de la résistance rotorique en fonction du glissement est proposée.

Il est important de tenir compte de cette variation dans le cadre de notre étude car le démarrage d'une machine asynchrone peut être la cause de creux de tension ou, en tout cas, peut les aggraver. D'autre part, les machines asynchrones alimentées directement par un réseau industriel ont majoritairement une double cage.

3.2.1 Evolution du couple en fonction du glissement.

Une machine à double cage présente une caractéristique du couple en fonction du glissement de la forme suivante :

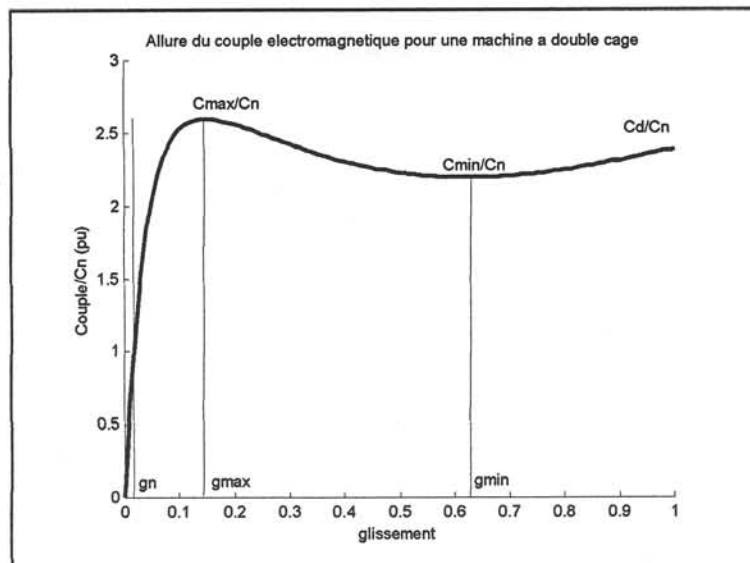


Figure 3: Allure du couple pour les machines à double cage

En se référant à la Figure 3, il est utile pour la suite de définir quelques points caractéristiques de la courbe :

- C_d : Couple de démarrage correspondant à $g=1$.
- C_{min} : Couple minimum correspondant à $g=g_{min}$.
- C_{max} : Couple maximum correspondant à g_{max} .
- C_n : Couple nominal correspondant à g_n .

3.2.2 Détermination de l'allure de la variation de la résistance rotorique en fonction du glissement

La méthode consiste à déterminer une loi de variation de la résistance rotorique en fonction du glissement pour que le couple ait une allure conforme à celle de la Figure 3. La variation de la résistance rotorique est représentée par un polynôme en g . Il s'agit par la suite de déterminer les coefficients de ce polynôme. Les données utilisées sont les valeurs du couple au démarrage, aux extremums et au point nominal comme définies précédemment.

L'étude est basée sur l'équation en régime permanent reliant le couple électromagnétique aux paramètres de la machine:

3.2.2.1 Caractéristiques de la fonction $f(g)=R(g)/g$

Soit $f(g)$, la fonction représentant le rapport entre la résistance rotorique et le glissement.

$f(g)$ doit vérifier les critères suivants :

- f est positive car $g > 0$ et $R(g) > 0 \forall g \in [0,1]$
- la limite de $f(g)$ quand g tend vers zéro est $+\infty$.

On propose alors de définir $f(g)$ comme suit :

$$f(g) = \sum_{j=1}^{N-1} k_j g^{j-1} + \frac{k_0}{g}$$

Le terme en $\frac{k_0}{g}$ permet de faire tendre $f(g)$ à $+\infty$ quand g tend vers zéro. Pour cela il faut que k_0 soit positif.

Le nombre N des coefficients k_j est égal au nombre de conditions que $f(g)$ doit vérifier. Ces conditions sont définies à partir de points caractéristiques de la courbe de la Figure 3 .

3.2.2.2 Conditions sur $f(g)$ à partir des points caractéristiques

En introduisant $f(g)$ dans l'Equation 4, et on obtient :

$$C(g) = \frac{3 * p * V_n^2}{\omega_s} \frac{f(g)}{(f(g))^2 + (N\omega_s)^2} \quad \text{Equation 5}$$

En se basant sur la courbe de la Figure 3, $f(g)$ doit satisfaire les conditions suivantes :

1. Couple de démarrage :

$$C(1)=C_d.$$

2. Couple minimum : pour $g=g_{\min}$ il faut que le couple soit égal au couple minimum et que la dérivée du couple en ce point soit nulle pour avoir un extremum, soit :

$$\begin{aligned} C(g_{\min}) &= C_{\min} \\ dC/dg)_{g=g_{\min}} &= 0 \end{aligned}$$

3. Couple nominal :

$$C(g_n)=C_n.$$

Le nombre de conditions à vérifier par f est donc de 4 ($N = 4$) et l'expression de $f(g)$ est :

$$f(g)=k_3g^2+k_2g+k_1+\frac{k_0}{g}.$$

3.2.2.3 Détermination des paramètres de $f(g)$

Les conditions précédentes portent sur le couple électromagnétique et sa dérivée par rapport au glissement, ce qui nous amène à calculer cette dérivée :

$$\Rightarrow \frac{dC(g)}{dg} = K \frac{\frac{df}{dg}(f_0^2 - f^2)}{((f(g))^2 + (N\omega_s)^2)^2} \quad \text{Equation 6}$$

avec $f_0 = N\omega_s$

Remarque : Le couple maximal étant un point caractéristique de la courbe décrivant le couple électromagnétique (Figure 3), on aurait pu ajouter les conditions relatives au couple maximal :

$$\begin{aligned} C(g_{\max}) &= C_{\max} \\ dC/dg)_{g=g_{\max}} &= 0 \end{aligned}$$

Or d'après l'Equation 6, représentant l'expression de la dérivée du couple, on remarque que pour $f=f_0$ la dérivée du couple par rapport au glissement est nulle. Donc le couple admet nécessairement un extremum en ce point. Si on calcule cet extremum on obtient :

$$C(g_0) = \frac{3 \cdot p \cdot V_n^2}{\omega_s} \frac{N\omega_s}{(N\omega_s)^2 + (N\omega_s)^2} = \frac{3 \cdot p \cdot V_n^2}{\omega_s} \frac{1}{2(N\omega_s)} = C_{\max}.$$

Donc il suffit que la fonction $f(g)$ passe par la valeur f_0 pour que la condition concernant le couple maximal soit vérifiée sans avoir besoin d'augmenter le nombre de paramètres à définir de 4 à 6.

Etablissement des relations entre les paramètres à définir :

Conditions de la forme $C(g_x) = C_x$ (1^{ère}, 2^{ème} et 4^{ème} conditions)

$$C(g_x) = \frac{3 \cdot q \cdot V_n^2}{\omega_s} \frac{f(g_x)}{(f(g_x))^2 + (N\omega_s)^2} = C_x \quad \text{Equation 7}$$

Deux solutions sont donc possibles pour chaque cas. Ceci nous amène à un résultat brut de 2^3 combinaisons pour le quadruplet k_0, k_1, k_2 et k_3 . Pour départager ces combinaisons, on est amené à exploiter les allures de la courbe $C(g)$, donc de ses dérivées.

Choix des solutions de $f(g)$ possibles :

La forme du couple à satisfaire correspond à l'allure de la Figure 3.

Au démarrage : $g=1$

En termes d'ordre de grandeur, la résistance rotorique peut être supposée négligeable par rapport à l'inductance de fuite. Finalement, au démarrage, on peut supposer que f_d est négligeable devant f_o .

Soit f_{d1} et f_{d2} les deux racines de l'Equation 7 au démarrage ($g=1$). La solution supérieure à f_o , si elle existe, est à rejeter. Si les deux solutions sont inférieures à f_o , celle qui est la plus proche est retenue. Supposons que f_{d1} soit la solution retenue pour $f(1)$.

Remarque : la condition ($f(1) = f_{d1} < f_o$) nous permet de s'assurer que la fonction f passera bien par la valeur f_o pour laquelle le couple est maximal puisqu'elle a été choisie pour tendre vers $+\infty$ quand g tend vers zéro.

En $g=g_{min}$

Soit f_{min1} et f_{min2} les deux racines de l'Equation 7 au point $g = g_{min}$.

Entre $g=1$ et $g=g_{min}$ la fonction $C(g)$ est croissante donc $\frac{dC}{dg} > 0$.

Or $\frac{dC(g)}{dg} = K \frac{\frac{df}{dg}(f_o^2 - f^2)}{((f(g))^2 + (N\omega_s)^2)^2}$, donc la dérivée du couple a le même signe que le produit $\frac{df}{dg}(f_o^2 - f^2)$.

Trois cas sont à distinguer selon que la position de la racine f_{mink} (k prenant les valeurs 1 ou 2) par rapport à f_o :

Dans le cas où $f_{mink} < f_{d1} < f_o$, $\frac{dC}{dg}$ et $\frac{df}{dg}$ sont de même signe et $\frac{dC}{dg} > 0$. Ceci est cohérent.

Dans le cas où $f_{d1} < f_{\text{mink}} < f_o$ $\frac{dC}{dg}$ et $\frac{df}{dg}$ sont de même signe et $\frac{df}{dg} > 0$. Ceci impose que $f_{d1} > f_{\text{mink}}$. Il y a donc contradiction avec l'hypothèse de départ et la racine est à rejeter.

Dans le cas où $f_{d1} < f_o < f_{\text{mink}}$, il existe une valeur du glissement entre $g = g_{\text{min}}$ et $g = 1$ pour laquelle le couple présente un extremum. Ceci est en contradiction avec l'hypothèse de départ d'un couple toujours croissant. La racine est à rejeter.

Finalement, seule la racine inférieure à f_{d1} est à retenir. Si les deux racines le sont, la plus proche de f_{d1} est retenue. Soit f_{min1} la bonne solution.

La troisième condition portant sur la nullité de la dérivée du couple en g_{min} se traduit alors par $\frac{df}{dg}(f_o^2 - f^2) = 0$ en $g = g_{\text{min}}$. Comme $f_{\text{min1}} < f_o$, la condition devient $\frac{df}{dg} \Big|_{g=g_{\text{min}}} = 0$

En $g = g_n$

Entre $g = 0$ et $g = g_{\text{max}}$ le couple $C(g)$ est croissant donc $\frac{dC}{dg} > 0$. D'autre part, $f(g)$ tend vers $+\infty$ quand g tend vers 0. Par un raisonnement analogue à celui qui a été fait précédemment, on peut montrer qu'il faut nécessairement retenir la racine de l'

Equation 7 supérieure à f_0 . Si les deux racines le sont, on choisira celle qui est la plus proche de f_0 .

On note f_{n1} la racine qui vérifie la condition.

Récapitulatif

- 1- $f(1) = f_{d1}$
- 2- $f(\text{min}) = f_{\text{min1}}$
- 3- $\frac{df}{dg} \Big|_{g=g_{\text{min}}} = 0$
- 4- $f(g_n) = f_{n1}$

Ce qui se traduit par les 4 équations à 4 inconnues (k_1, k_2, k_3 et k_4) suivantes :

$$k_3 + k_2 + k_1 + k_0 = f_{d1}$$

$$k_3 g_{\text{min}}^2 + k_2 g_{\text{min}} + k_1 + \frac{k_0}{g_{\text{min}}} = f_{\text{min1}}$$

$$2k_3 g_{\text{min}} + k_2 - \frac{k_0}{g_{\text{min}}} = 0$$

$$k_3 g_n^2 + k_2 g_n + k_1 + \frac{k_0}{g_n} = f_{n1}$$

3.2.2.4 Application numérique

Soit le moteur LS 225ST du catalogue LEROY SOMER (1985) dont les caractéristiques sont données au § 3.3.1.7 La caractéristique du couple est incluse dans le gabarit de la Figure 4. Ce gabarit est extrait du catalogue. Il est utile pour estimer graphiquement la valeur de C_{\min} et g_{\min} du moteur.

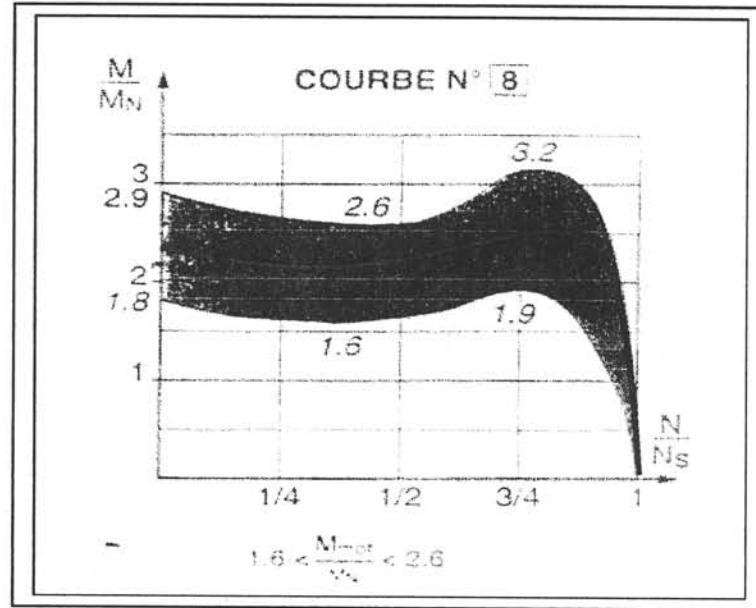


Figure 4: Donnée catalogue: couple électromagnétique

On prend $C_{\min}=2.2C_n$ et $g_{\min}=0.68$.

$C_{\max}=2.6C_n$; $C_d=2.4*C_n$ et $f_0=0.73$

On obtient : $k_3 = 0.7178$; $k_2 = -0.8536$; $k_1 = 0.5566$; $k_0 = 0.0567$

La fonction $f(g)=\frac{Rr(g)}{g}=0.7178 g^2-0.8536 g+0.5566 +\frac{0.0567}{g}$ est représentée sur la Figure 5 .

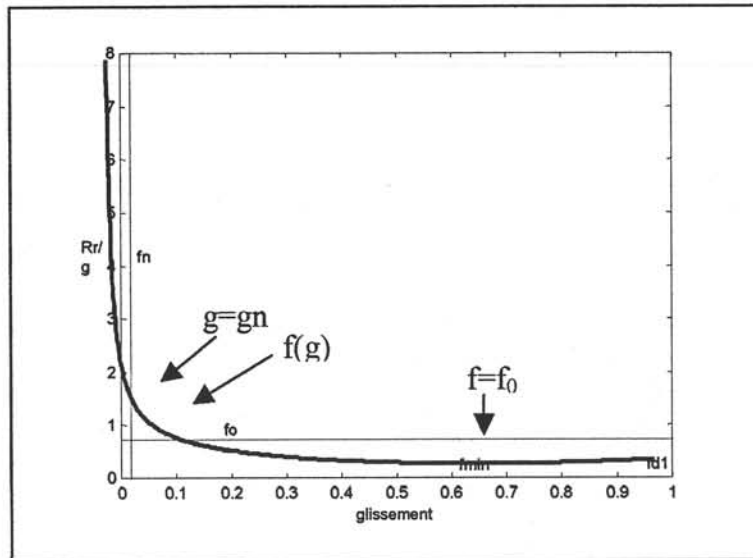


Figure 5: Allure de $f(g) = R_r(g)/g$

Ceci se traduit par la variation de la résistance rotorique en fonction du glissement suivante :

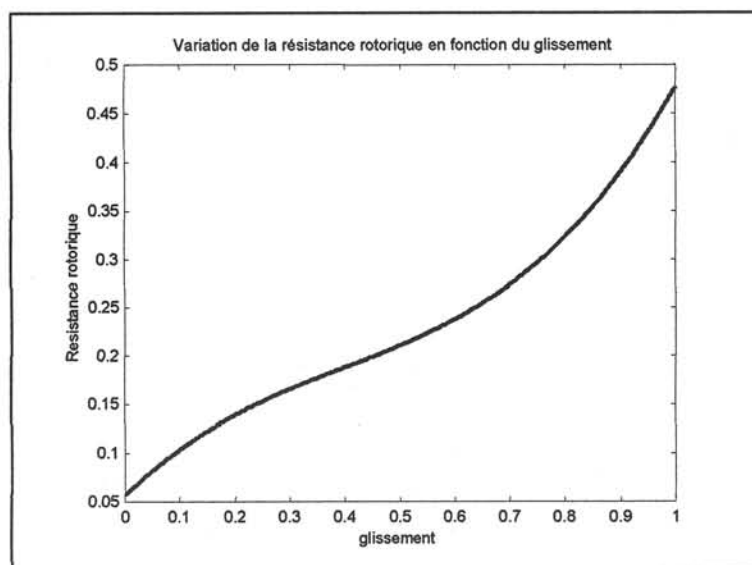


Figure 6: Variation de la résistance rotorique en fonction du glissement

Finalement, l'allure du couple avec et sans prise en compte de l'effet de peau est représentée sur la Figure 7 ci-dessous. Elle est bien incluse dans le gabarit donné par le constructeur.

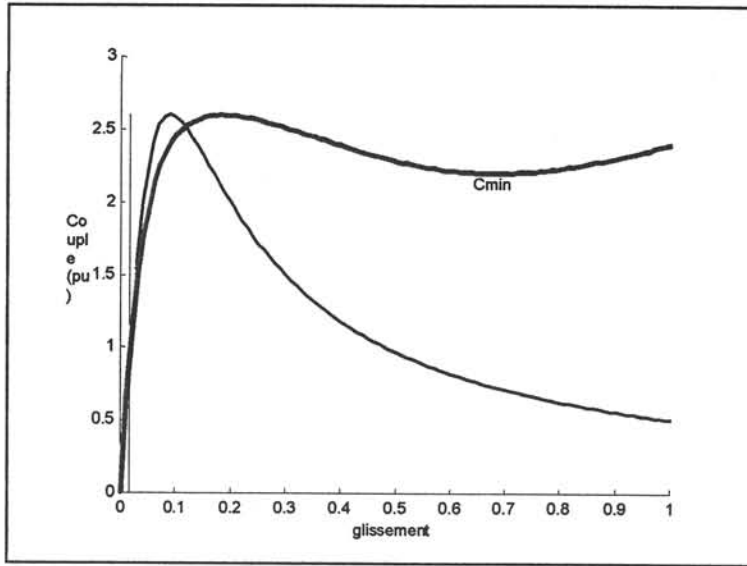


Figure 7: Allure du couple électromagnétique avec et sans prise en compte de l'effet de peau

4 Modélisation dynamique de la machine à induction en régime équilibré

Dans cette section, on considère que la machine est toujours alimentée par un système de tensions triphasé équilibré direct.

La modélisation dynamique de la machine à induction est basée sur l'équation mécanique et sur les équations électriques statoriques et rotoriques. Pour tous les ordres de modélisation, l'équation mécanique ne change pas, seuls le nombre et la forme des équations électriques variant.

Le modèle de Park suivant deux axes en quadrature (d,q) est utilisé pour la modélisation. Les grandeurs (d,q) sont calculées dans un repère tournant à la vitesse $\dot{\theta}$ égale à la vitesse de synchronisme. Ce repère, contrairement au repère de Concordia fixe par rapport au stator ($\dot{\theta}=0$), permet d'avoir une valeur continue de la tension. Autrement dit, l'intérêt d'un modèle dans le référentiel de Park réside dans son caractère invariant, c'est à dire que la variable temps n'apparaît pas explicitement dans les équations. Finalement, le choix du modèle de Park doit permettre de diminuer les temps de simulation. Par ailleurs, on ne s'intéresse qu'aux évolutions temporelles des valeurs efficaces et phases des grandeurs électriques et non aux évolutions temporelles des ondes. Le modèle de Concordia n'est donc pas utile.

4.1 Modèle du cinquième ordre

Les équations de la machine à induction dans un repère (d,q) tournant à la vitesse $\dot{\theta}$, sont les suivantes :

$$\begin{aligned} \dot{\Psi}_{ds} &= -(1/\sigma T_s)\Psi_{ds} + \dot{\theta}\Psi_{qs} + (k_2/\sigma T_s)\Psi_{dr} + v_{ds} \\ \dot{\Psi}_{qs} &= -\dot{\theta}\Psi_{ds} - (1/\sigma T_s)\Psi_{qs} + (k_2/\sigma T_s)\Psi_{qr} + v_{qs} \\ \dot{\Psi}_{dr} &= (1/\sigma T_r)\Psi_{ds} + (1/\sigma T_r)\Psi_{dr} + \dot{\lambda}\Psi_{qr} \\ \dot{\Psi}_{qr} &= (1/\sigma T_r)\Psi_{qs} - \dot{\lambda}\Psi_{dr} - (1/\sigma T_r)\Psi_{qr} \\ \dot{g} &= -(q^*k^2/\sigma\omega_s T_s R_s J)(\Psi_{qs}\Psi_{dr} - \Psi_{ds}\Psi_{qr}) + (1/J\omega_s) * C_{résistant} \end{aligned} \quad \text{Equation 8}$$

avec $\dot{\lambda} = \dot{\theta} - (1-g)\omega_s$

Notations relatives à l'Equation 8

v_{ds} : tension statorique dans l'axe d

v_{qs} : tension statorique dans l'axe q

Ψ_{ds} : flux statorique dans l'axe d

Ψ_{qs} : flux statorique dans l'axe q

Ψ_{dr} : flux rotorique dans l'axe d

Ψ_{qr} : flux rotorique dans l'axe q

ω_s : pulsation statorique

θ : position de l'axe d du repère de Park par rapport à un référentiel fixe.

σ : facteur de dispersion

k : facteur de couplage entre le stator et le rotor ($k^2=1-\sigma$)

T_s : constante de temps statorique

T_r : constante de temps rotorique

g : glissement

q : nombre de paires de pôles

J : Moment d'inertie

Les tensions v_{ds} et v_{qs} sont calculées à partir de la transformée de Park avec conservation des puissances (voir Annexe 1) :

$$\begin{aligned} v_{ds} &= \sqrt{2/3}[V_a \cos(\theta) + V_b \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) + V_c \cos(\theta + \frac{2\pi}{3})] \\ v_{qs} &= \sqrt{2/3}[-V_a \sin(\theta) - V_b \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) - V_c \sin(\theta + \frac{2\pi}{3})] \end{aligned}$$

Remarque : Pour la suite on considère le cas où $\dot{\theta} = \omega_s$, ce qui implique $\dot{\lambda} = g\omega_s$.

On obtient, pour un système de tensions triphasé équilibré direct en prenant la phase de V_a comme référence de phase :

$$v_{ds} = \sqrt{\frac{3}{2}} V_m \text{ et } v_{qs} = 0. \text{ (voir annexe 1)}$$

V_m représente la valeur maximale de la tension. Donc $v_{ds} = \sqrt{3} V_{\text{efficace}}$.

4.1.1 Calcul du courant :

Le courant est obtenu à partir de :

$$\begin{cases} i_{ds} = \frac{1}{\sigma R_s T_s} (\Psi_{ds} - k^2 \Psi_{dr}) \\ i_{qs} = \frac{1}{\sigma R_s T_s} (\Psi_{qs} - k^2 \Psi_{qr}) \end{cases} \quad \text{Équation 2}$$

4.1.2 Calcul des puissances :

Les puissances actives et réactives s'écrivent :

$$\begin{cases} P = v_{ds} i_{ds} + v_{qs} i_{qs} \\ Q = -v_{qs} i_{ds} + v_{ds} i_{qs} \end{cases} \quad \text{Équation 3}$$

4.2 Modèle du troisième ordre

Le modèle du troisième ordre de la machine à induction est issu du modèle du cinquième ordre par annulation des transitoires statoriques (voir Annexe 2), soit en faisant :

$$\dot{\Psi}_{ds} = 0 \text{ et } \dot{\Psi}_{qs} = 0.$$

Le système d'équation devient alors:

$$\begin{cases} \dot{\Psi}_{dr} = -(m/T_r)(1 + \sigma \omega_s^2 T_s^2) \Psi_{dr} + (k_2 m \omega_s \frac{T_s}{T_r} + g \omega_s) \Psi_{qr} + (m \frac{T_s}{T_r}) v_{ds} \\ \dot{\Psi}_{qr} = -(k_2 m \omega_s \frac{T_s}{T_r} + g \omega_s) \Psi_{dr} - (m/T_r)(1 + \sigma \omega_s^2 T_s^2) \Psi_{qr} - (\sigma m \omega_s \frac{T_s^2}{T_r}) v_{ds} \\ \dot{g} = (\frac{q k_4 m}{R_s J})(\Psi_{dr}^2 + \Psi_{qr}^2) + \frac{q k_2 m}{\omega_s R_s J} (\sigma \omega_s T_s \Psi_{dr} + \Psi_{qr}) v_{ds} + \frac{1}{J \omega_s} C_{\text{résistant}} \end{cases} \quad \text{Équation 4}$$

avec :

$$\begin{cases} \Psi_{ds} = m(k_2 \Psi_{dr} + \sigma k_2 \omega_s T_s \Psi_{qr} + \sigma T_s v_{ds}) \\ \Psi_{qs} = m(-\sigma k_2 \omega_s T_s \Psi_{dr} + k_2 \Psi_{qr} - \sigma^2 \omega_s T_s^2 v_{ds}) \end{cases}$$

$$\text{où } m = \frac{1}{1 + \sigma^2 \omega_s^2 T_s^2}$$

4.3 Modèle du second ordre

Le modèle du second ordre dérive lui-même du modèle du 3^{ème} ordre (voir Annexe 4). Par contre, les deux équations différentielles relatives aux grandeurs rotoriques sont remplacées par une seule équation. En effet, on suppose que le rapport $\frac{\Psi_{dr}}{\Psi_{qr}}$ dépend uniquement de la valeur du glissement. [9]. Autrement dit, on suppose que la position du flux rotorique dans le référentiel (d,q) ne dépend que du glissement.

Soit $\Psi_r = \sqrt{\Psi_{dr}^2 + \Psi_{qr}^2}$. La valeur de Ψ_r est donnée à chaque nouveau pas de temps par la résolution du système différentiel suivant :

$$\dot{\Psi}_r = -\left(\frac{m}{T_r}\right)(1 + \sigma\omega_s^2 T_s^2)\Psi_r + \left[\left(hm\frac{T_s}{T_r}\right)(1 + \sigma\omega_s^2 T_s^2)\right]v_{ds}$$

Équation 5

$$\dot{g} = \left(\frac{q^4 m}{R_s J}\right)\Psi_r^2 - \left(\frac{qk^2 h}{R_s J}\right)(k^2 m T_s + g T_r)\Psi_r v_{ds} + \frac{1}{J\omega_s} C_{résistant}$$

$$\text{où : } h = \frac{1}{\sqrt{[(\omega_s T_s + g\omega_s T_r)^2 + (\sigma\omega_s^2 T_s T_r - 1)^2]}}$$

D'un autre côté, le rapport $\frac{\Psi_{dr}}{\Psi_{qr}}$ (g) est donné par son équation en régime permanent puisque sa dynamique est supposée négligeable.

$$\text{Finalement, il est possible de calculer : } \Psi_{dr} = \Psi_r \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{\Psi_{qr}^2}{\Psi_{dr}^2}}} \text{ et } \Psi_{qr} = \Psi_r \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{\Psi_{dr}^2}{\Psi_{qr}^2}}}$$

4.4 Modèle du premier ordre

Pour obtenir le modèle du premier ordre, tous les transitoires électriques sont négligés. Le système d'équation descriptif de la machine devient alors (voir Annexe 3):

$$\dot{g} = -\frac{q}{J} \left(\frac{k^2 m T_s}{R_s T_r} \right) \left(\frac{g}{f^2 + (m + g\omega_s)^2} \right) v_{ds}^2 + \frac{1}{J\omega_s} C_{résistant}$$

Équation 6

Les flux rotorique et statorique sont déduits des expressions suivantes :

$$\Psi_{ds} = m(k^2 \Psi_{dr} + \sigma k^2 \omega_s T_s \Psi_{qr} + \sigma T_s v_{ds})$$

$$\Psi_{qs} = m(-\sigma k^2 \omega_s T_s \Psi_{dr} + k^2 \Psi_{qr} - \sigma^2 \omega_s T_s^2 v_{ds})$$

$$\Psi_{dr} = \frac{1}{D} \left[\left(m \frac{T_s}{T_r} \right) f - \left(\sigma m \omega_s \frac{T_s^2}{T_r} \right) r \right] v_{ds}$$

$$\Psi_{qr} = -\frac{1}{D} \left[\left(\sigma m \omega_s \frac{T_s^2}{T_r} \right) f + \left(m \frac{T_s}{T_r} \right) r \right] v_{ds}$$

où :

$$f = \frac{m}{T_r} (1 + \sigma \omega_s^2 T_s^2)$$

$$r_0 = k_2^2 m \omega_s \frac{T_s}{T_r}$$

$$D = f^2 + r^2$$

$$r = r_0 + g \omega_s$$

5 Modélisation dynamique de la machine à induction en régime déséquilibré

On considère maintenant que la machine peut être alimentée par un système de tensions triphasé déséquilibré. A l'apparition d'un creux, les amplitudes et les phases des trois tensions ne sont donc pas nécessairement identiques (voir Annexe 5).

5.1 Composition du système triphasé dans le repère de Park

Soit un système triphasé déséquilibré de tensions sinusoïdales d'amplitude maximale V_a , V_b , V_c :

$$v_a = V_a \cos(\omega_s t + \alpha_a)$$

$$v_b = V_b \cos(\omega_s t + \alpha_b + \frac{2\pi}{3})$$

Équation 7

$$v_c = V_c \cos(\omega_s t + \alpha_c - \frac{2\pi}{3})$$

Ce système déséquilibré est la superposition de trois systèmes équilibrés :

- l'un direct
- l'autre inverse
- et le troisième homopolaire

En notation complexe, les tensions sont décrites par :

$$\bar{V}_a = \bar{V}_d + \bar{V}_i + \bar{V}_o$$

$$\bar{V}_b = a^2 \bar{V}_d + a \bar{V}_i + \bar{V}_o$$

Équation 8

$$\bar{V}_c = a \bar{V}_d + a^2 \bar{V}_i + \bar{V}_o$$

Le système direct est \bar{V}_d , $a^2 \bar{V}_d$, $a \bar{V}_d$; le système inverse est \bar{V}_i , $a \bar{V}_i$, $a^2 \bar{V}_i$ et le système homopolaire est \bar{V}_o , \bar{V}_o , \bar{V}_o .

Il résulte de ces définitions que :

$$\begin{aligned}
 v_a &= V_d \cos(\omega_s t + \alpha_d) + V_i \cos(\omega_s t + \alpha_i) + V_o \cos(\omega_s t + \alpha_o) \\
 v_b &= V_d \cos(\omega_s t + \alpha_d - \frac{2\pi}{3}) + V_i \cos(\omega_s t + \alpha_i + \frac{2\pi}{3}) + V_o \cos(\omega_s t + \alpha_o) \\
 v_c &= V_d \cos(\omega_s t + \alpha_d + \frac{2\pi}{3}) + V_i \cos(\omega_s t + \alpha_i - \frac{2\pi}{3}) + V_o \cos(\omega_s t + \alpha_o)
 \end{aligned}
 \tag{Équation 9}$$

Le calcul de l'amplitude de v_a , v_b , v_c ainsi que de leur phase respective α_a , α_b , α_c . est détaillé dans l'annexe 2.

Pour déterminer les équations différentielles de la machine à induction en régime déséquilibré, on va considérer la superposition des trois systèmes. Il s'agit donc de calculer les composantes de Park relatives à la composante directe, inverse et homopolaire.

5.1.1 Calcul de $V_{d_{sd}}$, $V_{q_{sd}}$ et $V_{o_{sd}}$ relatives au système direct :

$$\begin{aligned}
 \bar{V}_d &= V_{d_{sd}} + j V_{q_{sd}} \\
 V_{d_{sd}} &= \sqrt{2/3} [V_{ad} \cos(\omega_s t + \theta_o) + V_{bd} \cos(\omega_s t + \theta_o - \frac{2\pi}{3}) + V_{cd} \cos(\omega_s t + \theta_o + \frac{2\pi}{3})]
 \end{aligned}
 \tag{Équation 10}$$

$$V_{q_{sd}} = \sqrt{2/3} [-V_{ad} \sin(\omega_s t + \theta_o) - V_{bd} \sin(\omega_s t + \theta_o - \frac{2\pi}{3}) - V_{cd} \sin(\omega_s t + \theta_o + \frac{2\pi}{3})]$$

où :

$$\begin{aligned}
 V_{ad} &= V_d \cos(\omega_s t + \alpha_d) \\
 V_{bd} &= V_d \cos(\omega_s t + \alpha_d - \frac{2\pi}{3}) \\
 V_{cd} &= V_d \cos(\omega_s t + \alpha_d + \frac{2\pi}{3})
 \end{aligned}
 \tag{Équation 11}$$

(θ_o représente la position initiale du repère (d,q) par rapport au repère (a,b,c)).

Les composantes du système direct dans le référentiel de Park sont alors les suivantes : (voir annexe 1)

$$\Rightarrow \boxed{V_{d_{sd}} = \sqrt{\frac{3}{2}} V_d \cos(\alpha_d - \theta_o)} \text{ et } \boxed{V_{q_{sd}} = \sqrt{\frac{3}{2}} V_d \sin(\alpha_d - \theta_o)} \text{ où } V_d \text{ représente le module de la valeur maximale de } \bar{V}_d.$$

N.B : $v_{o_{sd}} = 0$ car le système direct est équilibré

5.1.2 Calcul de V_{dsi} , V_{qsi} et V_{osi} relatives au système inverse :

Pour le système inverse, on considère le repère de Park tournant à la vitesse $-\omega_s = \dot{\theta}^*$

$$\Rightarrow \theta^* = -\omega_s t + \theta_0^*$$

(θ_0^* est la position initiale du repère (d,q) par rapport au repère (a,b,c)

$$\text{Soit : } \vec{V}_i = v_{dsi} + v_{qsi}$$

$$v_{dsi} = \sqrt{2/3} [V_{ai} \cos(\theta^*) + V_{bi} \cos(\theta^* - \frac{2\pi}{3}) + V_{ci} \cos(\theta^* + \frac{2\pi}{3})]$$

$$v_{qsi} = \sqrt{2/3} [-V_{ai} \sin(\theta^*) - V_{bi} \sin(\theta^* - \frac{2\pi}{3}) - V_{ci} \sin(\theta^* + \frac{2\pi}{3})]$$

$$V_{ai} = V_i \cos(\omega_s t + \alpha_i)$$

$$V_{bi} = V_i \cos(\omega_s t + \alpha_i + \frac{2\pi}{3})$$

$$V_{ci} = V_i \cos(\omega_s t + \alpha_i - \frac{2\pi}{3})$$

$$\Rightarrow \vec{V}_i = \sqrt{\frac{3}{2}} V_i e^{-j(-\omega_s t + \theta_0^*)} e^{-j(\omega_s t + \alpha)} = \sqrt{\frac{3}{2}} V_i e^{-j(\alpha_i + \theta_0^*)}$$

$$\Rightarrow \boxed{v_{dsi} = \sqrt{\frac{3}{2}} V_i \cos(\alpha_i + \theta_0^*)} \text{ et } \boxed{v_{qsi} = -\sqrt{\frac{3}{2}} V_i \sin(\alpha_i + \theta_0^*)}$$

Équation 12

N.B : $v_{osi} = 0$ car le système inverse est équilibré.

5.1.3 Calcul de V_{dso} , V_{qso} et V_{oso} relatives au système homopolaire

Considérons le système homopolaire :

$$V_{ao} = V_o \cos(\omega_s t + \alpha_o)$$

$$V_{bo} = V_o \cos(\omega_s t + \alpha_o)$$

$$V_{co} = V_o \cos(\omega_s t + \alpha_o)$$

$\forall \theta$, En appliquant la transformation de Park, on obtient :

$$V_{dso} = 0$$

$$V_{qso} = 0$$

Équation 13

$$V_{oso} = \sqrt{3} V_o \cos(\omega_s t + \alpha_o)$$

5.1.4 Modèle du cinquième ordre

Pour le système direct, les équations différentielles sont les mêmes qu'en régime équilibré, la tension v_{ds} correspondant à v_{dsd} .

Pour le système triphasé inverse, le repère de Park tourne à la vitesse $-\omega_s$. Il faut remplacer les ω_s par $-\omega_s$ dans les équations électriques, ainsi que v_{ds} par v_{dsi} . Pour l'équation mécanique il faut en plus remplacer le glissement g par $(2-g)$.

En effet, $g = \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s}$ dans le cas direct alors que dans le cas inverse on a :

$$g_i = \frac{-\omega_s - \omega}{-\omega_s} = -\frac{-2\omega_s + \omega_s - \omega}{\omega_s} = 2 - \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s} = 2 - g.$$

On ne considère généralement pas l'influence du système homopolaire car le câblage étoile et la constitution du circuit magnétique font que la circulation d'un champ homopolaire est très difficile.

5.1.4.1 Equations électriques

$$\begin{aligned}\dot{\Psi}_{dsd} &= -(1/\sigma T_s)\Psi_{dsd} + \dot{\theta}\Psi_{qsd} + (k_2/\sigma T_s)\Psi_{drd} + v_{dsd} \\ \dot{\Psi}_{qsd} &= -\dot{\theta}\Psi_{dsd} - (1/\sigma T_s)\Psi_{qsd} + (k_2/\sigma T_s)\Psi_{qrd} + v_{qsd} \\ \dot{\Psi}_{drd} &= (1/\sigma T_r)\Psi_{dsd} + (1/\sigma T_r)\Psi_{drd} + g\omega_s\Psi_{qrd} \\ \dot{\Psi}_{qrd} &= (1/\sigma T_r)\Psi_{qsd} - g\omega_s\Psi_{drd} - (1/\sigma T_r)\Psi_{qrd}\end{aligned}$$

Équation 14

$$\begin{aligned}\dot{\Psi}_{dsi} &= -(1/\sigma T_s)\Psi_{dsi} + \dot{\theta}^*\Psi_{qsd} + (k_2/\sigma T_s)\Psi_{dri} + v_{dsi} \\ \dot{\Psi}_{qsi} &= -\dot{\theta}^*\Psi_{dsi} - (1/\sigma T_s)\Psi_{qsi} + (k_2/\sigma T_s)\Psi_{qri} + v_{qsi} \\ \dot{\Psi}_{dri} &= (1/\sigma T_r)\Psi_{dsi} + (1/\sigma T_r)\Psi_{dri} - (2-g)\omega_s\Psi_{qri} \\ \dot{\Psi}_{qri} &= (1/\sigma T_r)\Psi_{qsi} + (2-g)\omega_s\Psi_{dri} - (1/\sigma T_r)\Psi_{qri}\end{aligned}$$

5.1.4.2 L'équation mécanique

Pour l'équation mécanique, il faut tenir compte du couple dû à la composante inverse :
Les expressions des couples direct et inverse sont :

$$C_d = \frac{qk_2}{\sigma T_s R_s} (\Psi_{qsd}\Psi_{drd} - \Psi_{dsd}\Psi_{qrd})$$

$$C_i = \frac{qk_2}{\sigma T_s R_s} (\Psi_{qsi}\Psi_{dri} - \Psi_{dsi}\Psi_{qri})$$

Équation 15

$$\Rightarrow \dot{g} = -\left(\frac{1}{J\omega_s}\right)(C_d + C_i) + \frac{1}{J\omega_s} C_{\text{résistant}}$$

$$\Rightarrow \dot{g} = -\left(\frac{q^* k_2}{\sigma J \omega_s T_s R_s}\right) (\Psi_{qsd} \Psi_{drd} - \Psi_{dsd} \Psi_{qrd}) + (\Psi_{qsi} \Psi_{dri} - \Psi_{dsi} \Psi_{qri}) + \frac{1}{J\omega_s} C_{\text{résistant}} \quad \text{Équation 16}$$

5.1.5 Modèle du troisième ordre

Pour le modèle du troisième ordre relatif au système inverse, le calcul est similaire au cas direct, en remplaçant ω_s par $-\omega_s$ et g par $(2-g)$.

Les couples direct et inverse sont évalués à partir des formules suivantes :

$$C_d = -m \frac{qk^4 \omega_s}{R_s} (\Psi_{drd}^2 + \Psi_{qrd}^2) - \frac{mk^2}{R_s} (\sigma \omega_s T_s \Psi_{drd} + \Psi_{qrd}) V_{dsd}$$

Équation 17

$$C_i = m \frac{qk^4 \omega_s}{R_s} (\Psi_{dri}^2 + \Psi_{qri}^2) - \frac{mk^2}{R_s} (-\sigma \omega_s T_s \Psi_{dri} + \Psi_{qri}) V_{dsi}$$

le système d'équations est alors le suivant :

$$\dot{\Psi}_{drd} = -(m/T_r)(1 + \sigma \omega_s^2 T_s^2) \Psi_{drd} + (k^2 m \omega_s \frac{T_s}{T_r} + g \omega_s) \Psi_{qrd} + (m \frac{T_s}{T_r}) V_{dsd}$$

$$\dot{\Psi}_{qrd} = -(k^2 m \omega_s \frac{T_s}{T_r} + g \omega_s) \Psi_{drd} - (m/T_r)(1 + \sigma \omega_s^2 T_s^2) \Psi_{qrd} - (\sigma m \omega_s \frac{T_s^2}{T_r}) V_{dsd}$$

$$\dot{\Psi}_{dri} = -(m/T_r)(1 + \sigma \omega_s^2 T_s^2) \Psi_{dri} - (k^2 m \omega_s \frac{T_s}{T_r} + (2-g)\omega_s) \Psi_{qri} + (m \frac{T_s}{T_r}) V_{dsi}$$

Équation 18

$$\dot{\Psi}_{qri} = (k^2 m \omega_s \frac{T_s}{T_r} + (2-g)\omega_s) \Psi_{dri} - (m/T_r)(1 + \sigma \omega_s^2 T_s^2) \Psi_{qri} + (\sigma m \omega_s \frac{T_s^2}{T_r}) V_{dsi}$$

$$\dot{s} = m \frac{qk^4}{J R_s} (\Psi_{drd}^2 + \Psi_{qrd}^2 - \Psi_{dri}^2 - \Psi_{qri}^2) + \frac{mk^2}{J \omega_s R_s} [(\sigma \omega_s T_s \Psi_{drd} + \Psi_{qrd}) V_{dsd} + (-\sigma \omega_s T_s \Psi_{dri} + \Psi_{qri}) V_{dsi}] + \frac{1}{J \omega_s} C_{\text{résistant}}$$

5.1.6 Modèle du second ordre

On procède de même pour le modèle du second ordre d'où :

$$\dot{\Psi}_r = -\left(\frac{m}{T_r}\right)(1 + \sigma \omega_s^2 T_s^2) \Psi_{rd} + \left[\left(hm \frac{T_s}{T_r}\right)(1 + \sigma \omega_s^2 T_s^2)\right] V_{ds}$$

$$\dot{\Psi}_{dri} = -(m/T_r)(1 + \sigma \omega_s^2 T_s^2) \Psi_{dri} - (k^2 m \omega_s \frac{T_s}{T_r} + (2-g)\omega_s) \Psi_{qri} + (m \frac{T_s}{T_r}) V_{dsi}$$

$$\dot{\Psi}_{qri} = (k^2 m \omega_s \frac{T_s}{T_r} + (2-g)\omega_s) \Psi_{dri} - (m/T_r)(1 + \sigma \omega_s^2 T_s^2) \Psi_{qri} + (\sigma m \omega_s \frac{T_s^2}{T_r}) V_{dsi}$$

où :

$$h = \frac{1}{\sqrt{[(\omega_s T_s + g \omega_s T_r)^2 + (\sigma g \omega_s^2 T_s T_r - 1)^2]}}$$

$$C_d = -m \frac{qk^4 \omega_s}{R_s} (\Psi_r^2) + \frac{qhk^2}{R_s} \omega_s (k^2 m T_s + s T_r) \Psi_r v_{dsd}$$

$$C_i = m \frac{qk^4 \omega_s}{R_s} (\Psi_{dri}^2 + \Psi_{qri}^2) - \frac{qmk^2}{R_s} (-\sigma \omega_s T_s \Psi_{dri} + \Psi_{qri}) v_{dsi}$$

L'équation mécanique devient alors :

$$\dot{g} = \left(\frac{qk^4 m}{R_s J} \right) (\Psi_r^2 - \Psi_{dri}^2 - \Psi_{qri}^2) - \left(\frac{qk^2 h}{R_s J} \right) (k^2 m T_s + g T_r) \Psi_r v_{dsd} + \frac{mk^2}{J \omega_s R_s} (-\sigma \omega_s T_s \Psi_{dri} + \Psi_{qri}) v_{dsi} + \frac{1}{J \omega_s} C_{résistant}$$

Équation 19

5.1.7 Modèle du premier ordre

Finalement, pour le modèle du premier ordre :

$$\dot{g} = -\frac{q}{J} \left(\frac{k^2 m T_s}{R_s T_r} \right) \left[\left(\frac{g}{f^2 + (r_0 + g \omega_s)^2} \right) v_{dsd}^2 + \left(\frac{2-g}{f^2 + (-r_0 + (2-g) \omega_s)^2} \right) v_{dsi}^2 \right] + \frac{1}{J \omega_s} C_{résistant} \quad \text{Équation 20}$$

5.1.8 Calcul du courant et des puissances à partir des flux

5.1.8.1 Calcul du courant :

Le courant direct est obtenu à partir de :

$$i_{dsd} = \frac{1}{\sigma R_s T_s} (\Psi_{dsd} - k^2 \Psi_{drd})$$

Équation 21

$$i_{qsd} = \frac{1}{\sigma R_s T_s} (\Psi_{qsd} - k^2 \Psi_{qrd})$$

Le courant inverse est obtenu à partir de :

$$i_{qsi} = \frac{1}{\sigma R_s T_s} (\Psi_{qsi} - k^2 \Psi_{qri})$$

Équation 22

$$i_{dsi} = \frac{1}{\sigma R_s T_s} (\Psi_{dsi} - k^2 \Psi_{dri})$$

5.2 Calcul des puissances :

Les puissances actives et réactives dues aux composantes directes s'écrivent :

$$P_d = V_{dsd} i_{dsd}$$

Équation 23

$$Q_d = V_{dsd} i_{qsd}$$

De même, les puissances active et réactive dues aux composantes inverses s'écrivent :

$$P_i = V_{dsi} i_{dsi}$$

Équation 24

$$Q_i = V_{dsi} i_{qsi}$$

La puissance totale se calcule comme suit :

$$S = P + jQ = \bar{V}_a \bar{I}_a^* + \bar{V}_b \bar{I}_b^* + \bar{V}_c \bar{I}_c^*$$

Or, d'après l'Équation 8, on peut écrire en l'absence de composantes homopolaires :

$$\begin{aligned} S &= P + jQ = (\bar{V}_d + \bar{V}_i)(\bar{I}_d^* + \bar{I}_i^*) + (a_2 \bar{V}_d + a \bar{V}_i)(a \bar{I}_d^* + a_2 \bar{I}_i^*) + (a \bar{V}_d + a_2 \bar{V}_i)(a_2 \bar{I}_d^* + a \bar{I}_i^*) \\ &\Rightarrow S = P + jQ = 3 \bar{V}_d \bar{I}_d^* + 3 \bar{V}_i \bar{I}_i^* \end{aligned}$$

$$\Rightarrow P = P_d + P_i$$

$$\text{et } Q = Q_d + Q_i$$

5.2.1 Calcul du courant à partir des composantes (d,q) directes et inverses.

Les composantes homopolaires du courant sont nulles du fait du couplage étoile sans neutre habituellement rencontré pour les machines asynchrones. Les courants de phase sont alors obtenus par la superposition de deux systèmes triphasés équilibrés direct et inverse:

$$I_a = I_d \cos(\omega_s t + \beta_d) + I_i \cos(\omega_s t + \beta_i)$$

$$I_b = I_d \cos(\omega_s t + \beta_d - \frac{2\pi}{3}) + I_i \cos(\omega_s t + \beta_i + \frac{2\pi}{3})$$

Équation 25

$$I_c = I_d \cos(\omega_s t + \beta_d + \frac{2\pi}{3}) + I_i \cos(\omega_s t + \beta_i - \frac{2\pi}{3})$$

D'après la modélisation précédente de la machine à induction, I_d et I_i sont une combinaison des composantes dans le repère de Park tournant à ω_s et des composantes dans le repère de Park tournant à $(-\omega_s)$. L'annexe 2 présente le calcul relatif à la détermination de I_d, β_d et I_i, β_i à partir des composantes du courant dans le repère de Park (I_{dd}, I_{dq}) pour I_d et (I_{di} et I_{dq}) pour I_i .

Finalement, on trouve :

- pour la composante directe :

$$\Rightarrow I_d = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{I_{dd}}{\cos(\delta_d)} \text{ et } \beta_d = \tan^{-1}\left(\frac{I_{qd}}{I_{dd}}\right)$$

- pour la composante inverse :

$$\Rightarrow I_i = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{I_{di}}{\cos(\delta_i)} \text{ et } \beta_i = \alpha_i - \tan^{-1}\left(\frac{I_{qi}}{I_{di}}\right)$$

Pour les grandeurs triphasées I_a, I_b et I_c

$$\|I_a\| = I_d \sqrt{1 + \left(\frac{I_i}{I_d}\right)^2 + 2 \frac{I_i}{I_d} \cos(\beta_d - \beta_i)}$$

$$\|I_b\| = I_d \sqrt{1 + \left(\frac{I_i}{I_d}\right)^2 + 2 \frac{I_i}{I_d} \cos(\beta_d - \beta_i - \frac{4\pi}{3})}$$

$$\|I_c\| = I_d \sqrt{1 + \left(\frac{I_i}{I_d}\right)^2 + 2 \frac{I_i}{I_d} \cos(\beta_d - \beta_i + \frac{4\pi}{3})}$$

6 Modélisation de la machine à induction dans le cas de coupures dues à une ouverture des protections ($I_{stator}=0$)

Les machines à induction sont généralement protégées contre les surintensités qui peuvent survenir suite à un creux de tension.

Les modèles de machine à induction développés jusqu'à présent dans les paragraphes Dans le cas d'une ouverture des protections de la machine, la tension à ses bornes n'est plus imposée par l'alimentation. Il faut donc revoir les modèles précédents pour étudier le comportement de la machine dans ces conditions.

6.1 Mise en équation

Les équations générales reliant les tensions statoriques et rotoriques aux flux dans le repère de Park (d,q) sont les suivantes :

$$V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\Psi_{ds}}{dt} - \omega_s \Psi_{qs}$$

$$V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\Psi_{qs}}{dt} + \omega_s \Psi_{ds}$$

$$V_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d\Psi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega_m) \Psi_{qr} = 0$$

$$V_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d\Psi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega_m) \Psi_{dr} = 0$$

Et les relations reliant les flux aux courants sont les suivantes :

$$\begin{aligned} \Psi_{ds} &= L_s i_{ds} + L_{sr} i_{dr} \\ \Psi_{qs} &= L_s i_{qs} + L_{sr} i_{qr} \end{aligned} \quad L_{sr} \text{ étant la mutuelle inductance entre le stator et le rotor}$$

$$\begin{aligned} \Psi_{dr} &= L_r i_{dr} + L_{sr} i_{ds} \\ \Psi_{qr} &= L_r i_{qr} + L_{sr} i_{qs} \end{aligned}$$

avec $L_{sr} = k^2 L_s$ et $L_r = L_s + N$

Lorsque la protection en courant de la machine est ouverte $i_{ds} = i_{qs} = 0$.

Les équations précédentes deviennent alors :

$$\begin{aligned} \Psi_{ds} &= L_{sr} i_{dr} \\ \Psi_{qs} &= L_{sr} i_{qr} \\ \Psi_{dr} &= L_r i_{dr} \\ \Psi_{qr} &= L_r i_{qr} \end{aligned}$$

Ces équations impliquent que les expressions des flux statoriques ne dépendent que de grandeurs rotoriques.

En effet :

$$\begin{aligned} \Psi_{ds} &= L_{sr} i_{dr} = \frac{L_{sr}}{L_r} \Psi_{dr} = k^2 \Psi_{dr} \\ \Psi_{qs} &= L_{sr} i_{qr} = \frac{L_{sr}}{L_r} \Psi_{qr} = k^2 \Psi_{qr} \end{aligned}$$

En remplaçant les courants en fonction des flux dans les équations des tensions rotoriques on trouve :

$$\begin{aligned} 0 &= \frac{R_r}{L_r} \Psi_{dr} + \frac{d\Psi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega_m) \Psi_{qr} \\ 0 &= \frac{R_r}{L_r} \Psi_{qr} + \frac{d\Psi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega_m) \Psi_{dr} \end{aligned}$$

Or : $\lambda = \omega_s - \omega_m = s\omega_s$

Et : $T_r = \frac{L_r}{R_r}$

$$\frac{d\Psi_{dr}}{dt} = -\frac{1}{T_r} \Psi_{dr} + s\omega_s \Psi_{qr}$$

D'où :

Équation 26

$$\frac{d\Psi_{qr}}{dt} = -\frac{1}{T_r} \Psi_{qr} - s\omega_s \Psi_{dr}$$

- Calcul du couple électromagnétique :

Dans ces conditions le couple électromagnétique est nul car proportionnel au terme : $\Psi_{qs}\Psi_{dr} - \Psi_{ds}\Psi_{qr}$.

$$C \approx k^2(\Psi_{qr}\Psi_{dr} - \Psi_{dr}\Psi_{qr}) = 0$$

- Calcul de la tension induite au stator :

$$V_{ds} = \frac{d\Psi_{ds}}{dt} - \omega_s \Psi_{qs} = k^2 \left(\frac{d\Psi_{dr}}{dt} - \omega_s \Psi_{qr} \right) = k^2 \left(-\frac{1}{T_r} \Psi_{dr} + (s-1)\omega_s \Psi_{qr} \right)$$

$$V_{qs} = \frac{d\Psi_{qs}}{dt} + \omega_s \Psi_{ds} = k^2 \left(\frac{d\Psi_{qr}}{dt} + \omega_s \Psi_{dr} \right) = k^2 \left(-\frac{1}{T_r} \Psi_{qr} + (1-s)\omega_s \Psi_{dr} \right)$$

6.2 Application numérique

Soit le moteur LS 225ST du catalogue LEROY SOMER décrit précédemment.

Les simulations suivantes illustrent l'allure des différentes grandeurs lorsque le courant statorique s'annule suite à l'ouverture de la protection en amont de la machine à induction puis se rétablit.

6.2.1 Le courant statorique

Le courant statorique devient nul pendant l'ouverture de la protection, l'énergie dissipée au moment de l'ouverture l'est par l'arc électrique.

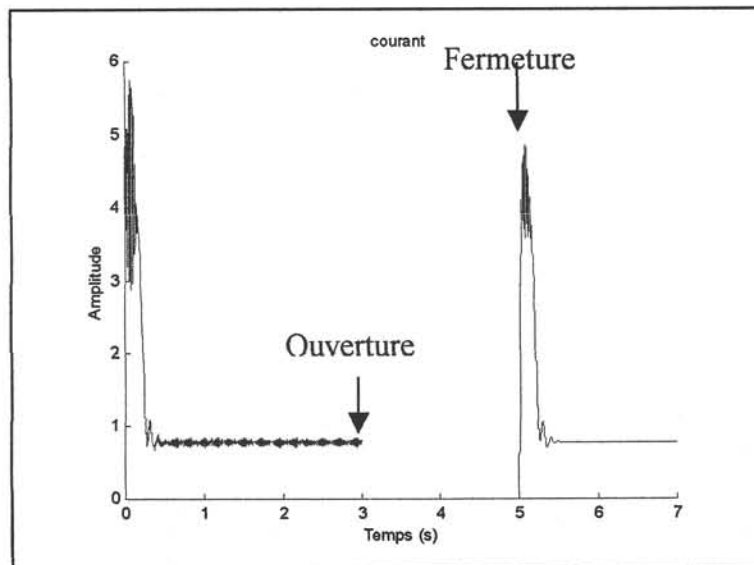


Figure 8: Allure du courant statorique

6.2.2 La tension statorique induite

Pendant l'ouverture, les champs rotoriques induisent une tension statorique appelée tension résiduelle.

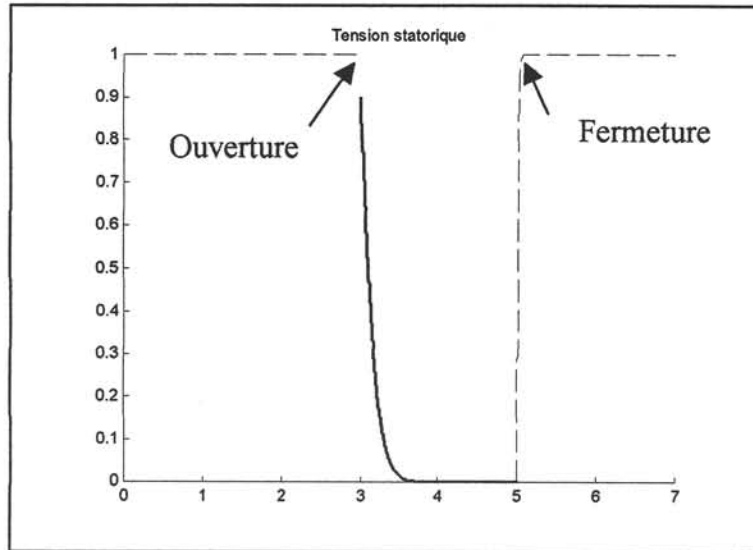


Figure 9: Tension au stator

6.2.3 Evolution temporelle du couple électromagnétique

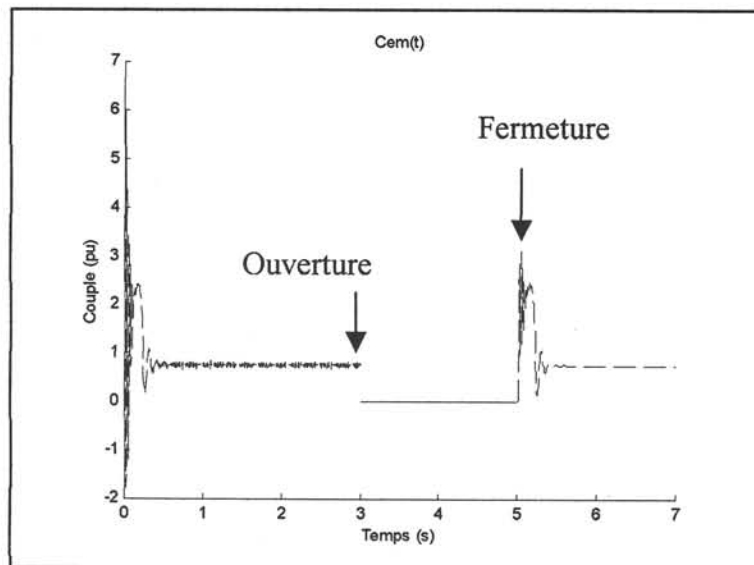


Figure 10: Evolution du couple électromagnétique

6.2.4 Le glissement

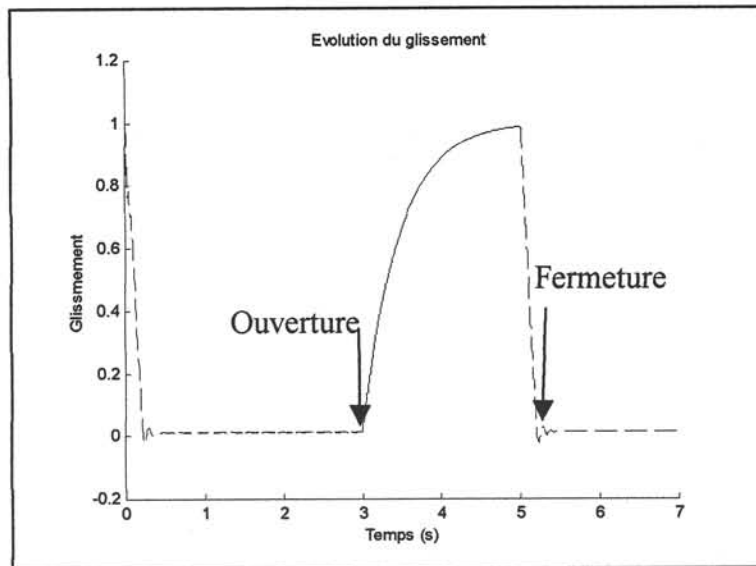


Figure 11: Evolution du glissement

7 Conclusion

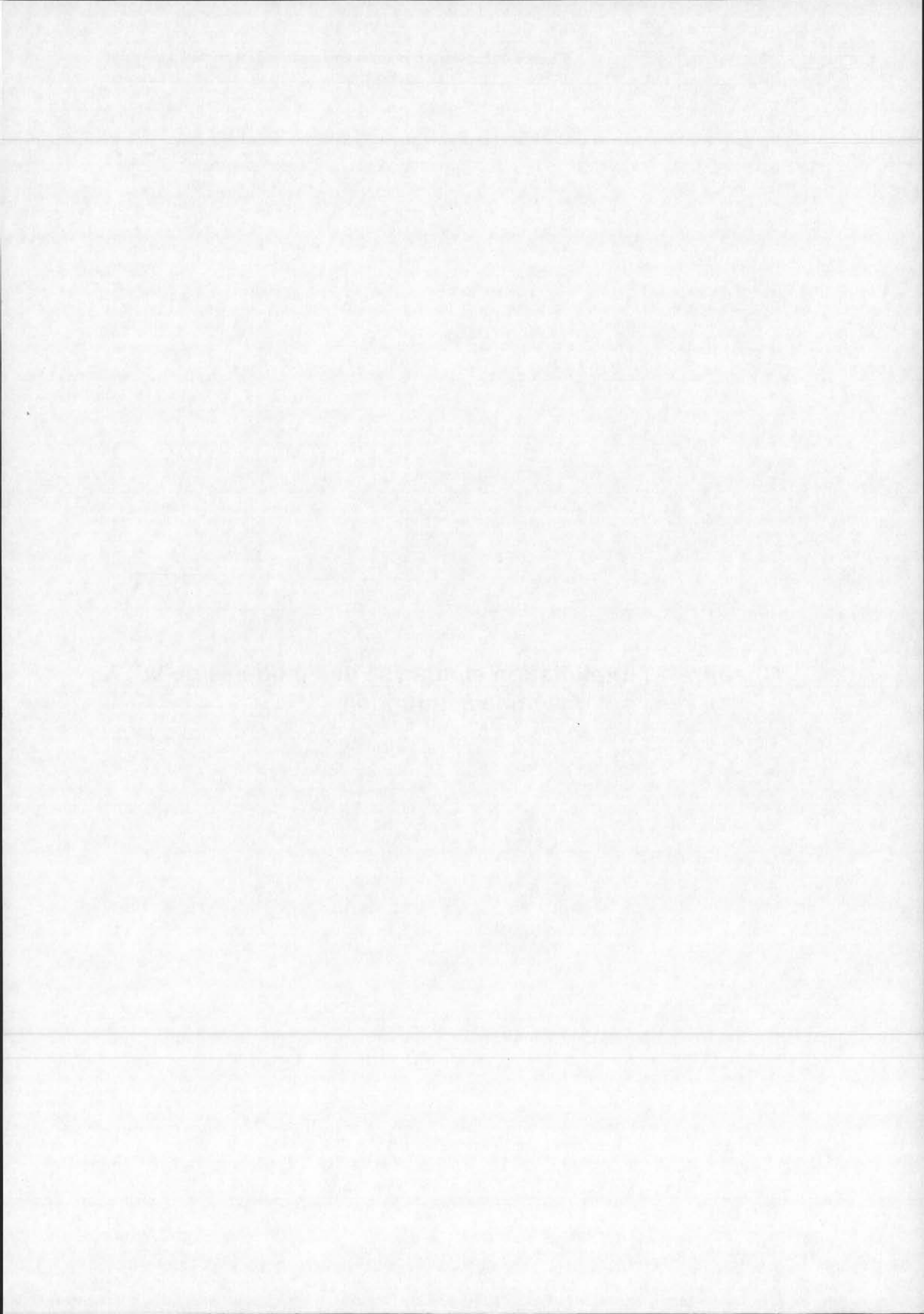
Le développement de l'outil de diagnostic pour l'étude des réseaux industriels requiert une modélisation fiable de la machine à induction. Les modèles dynamiques exposés dans ce chapitre se distinguent les uns des autres par leur degré de complexité et leur propension à fournir la meilleure simulation du comportement de la machine pendant les creux de tension.

Outre des modèles dynamiques classiques (1^{er}, 3^{ième} et 5^{ième} ordre) et celui du second ordre, deux types de modèles utiles pour notre étude ont été élaborés. Il s'agit du modèle à effet de peau, et du modèle spécifique à l'ouverture des protections qui permet d'avoir une idée sur la valeur de la tension induite au stator.

Tous les modèles proposés sont valables en régime déséquilibré. Toutefois, pour la prise en compte de l'effet de peau, il faudra adapter les valeurs des paramètres au schéma inverse.

Les modèles dynamiques feront l'objet d'une étude comparative, afin de pouvoir choisir quel modèle insérer dans la librairie du logiciel à construire.

**Chapitre 4 : Exploitation et analyse des modèles de la
machine à induction**



Chapitre 4 : Exploitation et analyse des modèles de la machine à induction

1	Introduction.....	94
2	Les transitoires électriques et mécaniques.....	95
2.1	Transitoires électriques.....	95
2.2	Transitoire mécanique.....	97
3	Exploitation du modèle statique pour le calcul de la tension de décrochage.....	98
4	Influence de l'effet de peau sur un creux de tension.....	99
4.1	Tension de décrochage.....	99
4.2	Variation de la résistance rotorique.....	107
4.3	Influence de l'effet de peau sur l'allure du couple pendant un creux de tension.....	110
4.4	Conclusion.....	113
5	Comparaison des différents ordres de modélisation.....	114
5.1	Au démarrage.....	114
5.2	Creux de tension de profondeur 40%.....	118
5.3	Au décrochage.....	120
5.4	Au rétablissement de la tension.....	125
6	Comparaisons des effet des creux équilibrés et déséquilibrés sur les machines à induction.....	127
7	Conclusion.....	131



1 Introduction

Le chapitre 4 présente une exploitation des différents modèles établis dans le chapitre précédent.

Les différents ordres de modèles de machines à induction utilisés se distinguent selon la prise en compte ou non des transitoires électriques statorique et rotorique. Ce chapitre débute par une présentation des grandeurs électriques (flux statorique et rotorique) (§2.1) et mécanique (glissement) (§2.2) et de leurs variations en fonction de l'ordre du modèle utilisé.

Le modèle statique servira de référence pour déduire la valeur de la tension de décrochage (§3).

Une étude plus spécifique de l'effet de peau est présentée dans le (§4). Elle met en valeur l'influence son influence sur la valeur de la tension de décrochage (§4.1), ainsi que l'intérêt de sa modélisation non seulement pendant la phase de démarrage mais également pour l'étude des creux de tension (§4.3).

La variation de la résistance rotorique qui est à la base de la modélisation est présentée également à l'apparition du creux et au rétablissement de la tension pour les différents modèles de la machine à induction.(§4.2).

D'autre part, les modèles de machine à induction de différents ordres sont comparés pendant le démarrage, pendant un creux de tension, au décrochage et au rétablissement de la tension (§5). Ces comparaisons ont pour but de choisir le modèle qui présentera le meilleur compromis entre fiabilité et simplicité. Le modèle du cinquième ordre servira de référence du fait qu'il prend en compte toutes les dynamiques de la machine.

Outre les modèles des machines, on compare, dans ce chapitre, l'impact des creux monophasés et biphasés sur les machines à induction par rapport aux creux triphasés(§6).

Remarque : Dans toutes les simulations le moteur LS225ST décrit dans le chapitre 3 sera utilisé.

Rappelons ses caractéristiques:

Tension composée nominale entre phase	(V)	: 400
fréquence du réseau	(Hz)	: $f=50$
Puissance nominale	(kW)	: 37
Vitesse nominale	(t/min)	:1475
Courant nominale	(A)	: 67
Facteur de puissance nominal		: 0.86
Couple maximal/Couple nominal		: 2.6
Couple minimum/Couple nominal		: 2.2
Glissement minimum		: 0.68
Moment d'inertie	(kg.m ²)	: 0.23
Temps de lancer de la charge	(s)	: 0.2
Ordre du couple de charge		:1

2 Les transitoires électriques et mécaniques

Dans cette section, les transitoires électriques et mécaniques donnés par les différents ordres de modélisation de la machine à induction (5^{ième}, 3^{ième}, 2nd et 1^{er} ordre) sont comparées entre eux.

2.1 Transitoires électriques

Le modèle du cinquième ordre est le seul à prendre en compte tous les transitoires électriques (statorique et rotorique). Les modèles du troisième et second ordre ne prennent en compte que les transitoires électriques rotorique alors que le modèle du premier ordre ne représente que le transitoire mécanique.

Les figures suivantes présentent les allures des flux statorique et rotorique pour les différents ordres pendant une séquence de démarrage.

2.1.1 Flux statorique

La Figure 1 et la Figure 2 présentent l'évolution du flux statorique dans les axes d et q. Le modèle du 5^{ième} ordre est le seul à ne pas négliger les transitoires statoriques. Par la suite, le régime transitoire électrique lié aux grandeurs statoriques est ignoré par les modèles d'ordre inférieur (3^{ième}, 2nd et 1^{er} ordre)

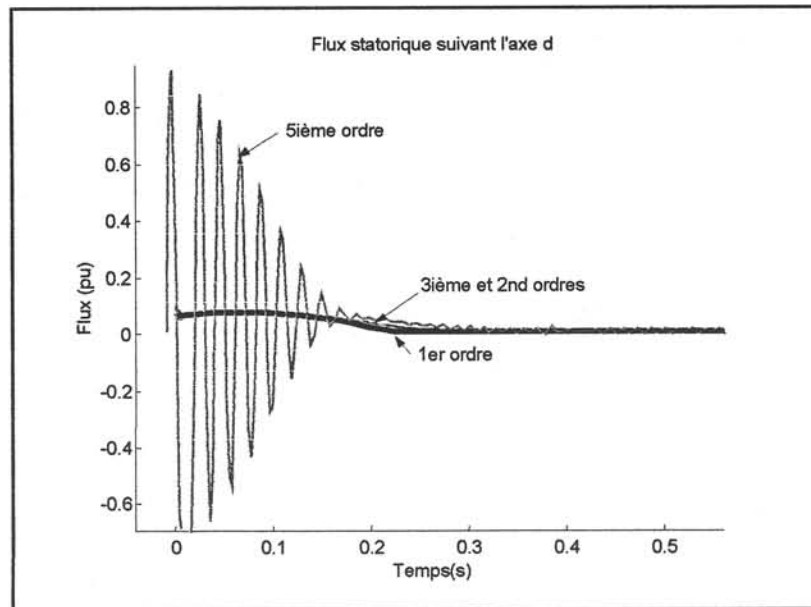


Figure 1 : évolution temporelle du flux statorique dans l'axe d pendant le démarrage.

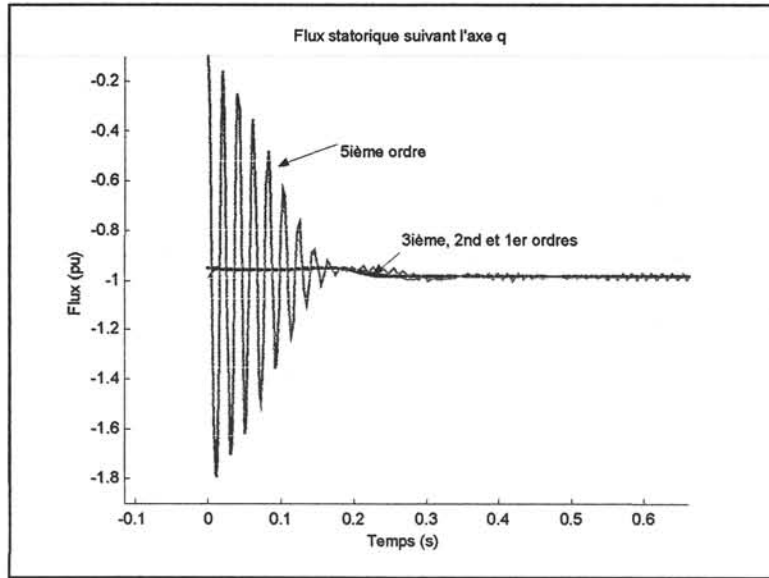


Figure 2 : évolution temporelle du flux statorique dans l'axe q pendant le démarrage.

2.1.2 Flux rotorique

La Figure 3 et la Figure 4 présentent l'évolution du flux rotorique dans les axes d et q. Le modèle du 5^{ème} ordre est le seul à prendre en compte les transitoires électriques statorique et rotorique, les modèles du troisième et du second ordre ne prenant en compte que les transitoires électriques rotorique. Par la suite, plus l'ordre est élevé mieux le régime transitoire électrique lié aux grandeurs rotoriques est représenté.

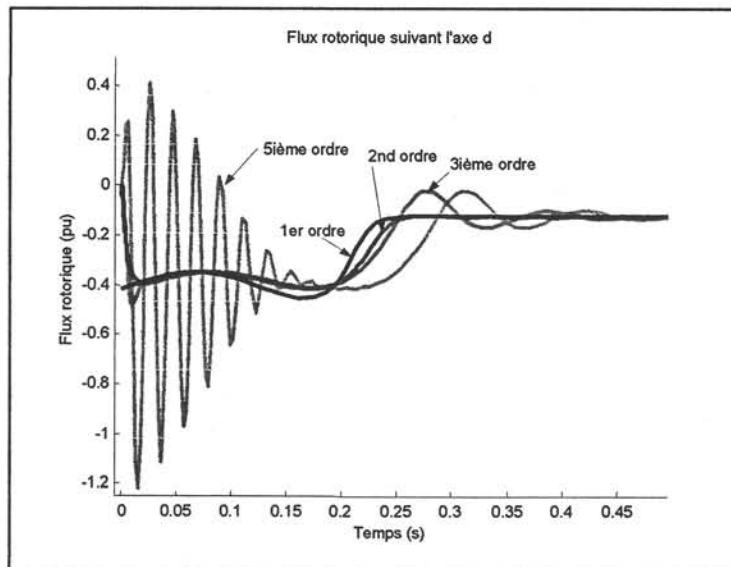


Figure 3 : évolution temporelle du flux rotorique dans l'axe d pendant le démarrage.

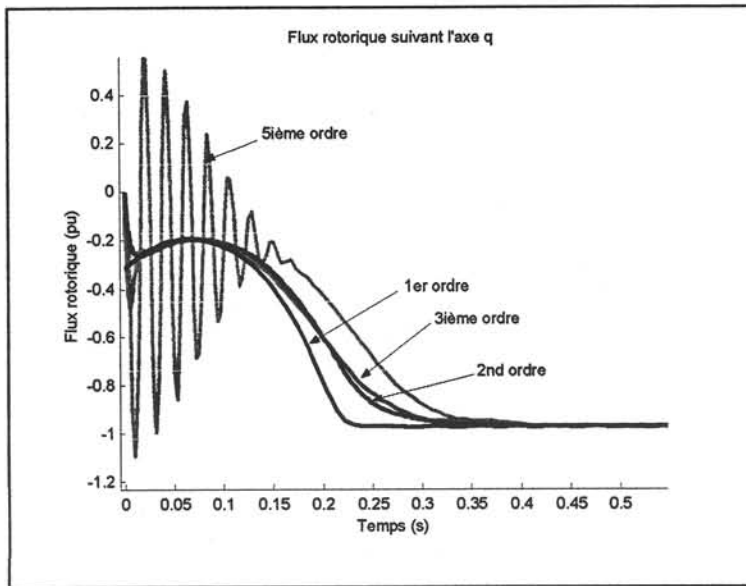


Figure 4 : évolution temporelle du flux rotorique dans l'axe q pendant le démarrage.

2.2 Transitoire mécanique

L'évolution du glissement (ou de la vitesse) permet de comparer le régime transitoire mécanique selon les différents ordres de modélisation.

La Figure 5 présente l'évolution du glissement depuis le démarrage. La durée du régime transitoire lié au glissement décroît avec l'ordre utilisé. D'autre part, les oscillations notamment autour du régime permanent sont occultées par les ordres inférieurs (1^{er} et 2^{ième} ordres)

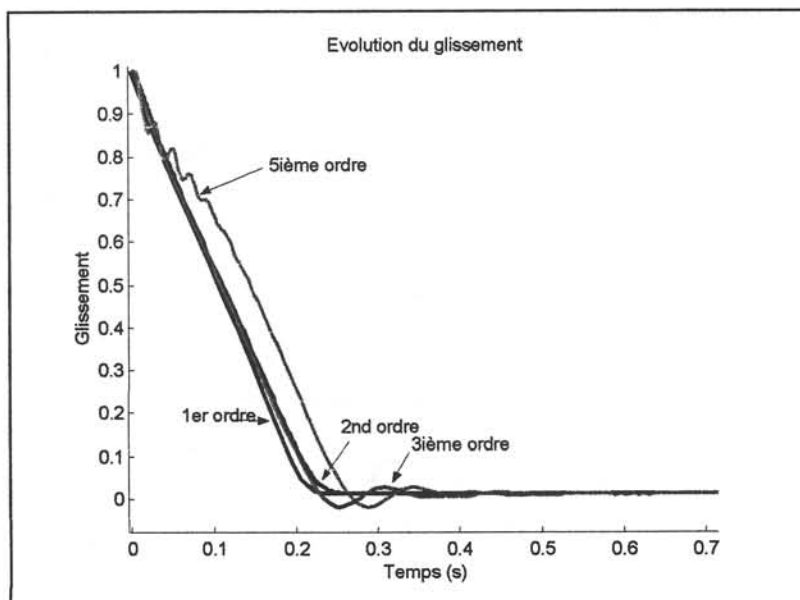


Figure 5 : évolution temporelle du glissement pendant le démarrage

3 Exploitation du modèle statique pour le calcul de la tension de décrochage

L'apparition des creux de tension peut dans certains cas provoquer le décrochage de la machine asynchrone. Ce phénomène est interprété graphiquement, soit par une intersection entre le couple moteur et le couple résistant dans la zone instable de la caractéristique couple/vitesse de la machine asynchrone soit par une absence d'intersection entre le couple résistant et le couple moteur. Dans ce cas, la vitesse décroît continuellement jusqu'à l'arrêt de la machine.

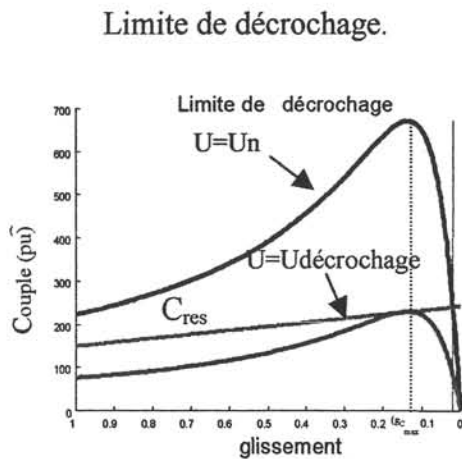


Figure 6 : Couple électromagnétique pour la tension de décrochage

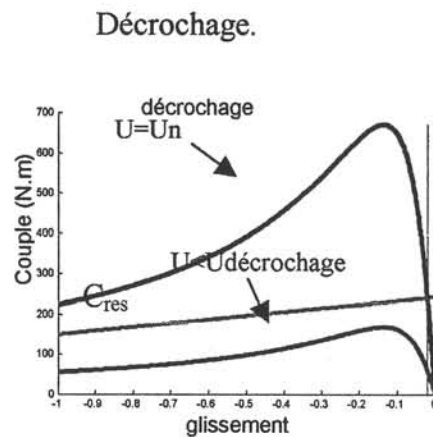


Figure 7 : Couple électromagnétique pour une tension inférieure à la tension de décrochage

Pour calculer la tension limite de décrochage, il faut trouver la tension pour laquelle le couple électromagnétique maximal est égal au couple résistant. $C((g)_{C_{max}}) = C_{résistant}((g)_{C_{max}})$. $(g)_{C_{max}}$ est la valeur du glissement rendant le couple maximum. Elle est indépendante de la tension d'alimentation de la machine :

$$(g)_{C_{max}} = \frac{R_r}{N\omega_s} \quad \text{Equation 1}$$

Pour cette valeur de $g=(g)_{C_{max}}$, le couple est maximal et vaut :

$$C_{max} = \frac{3V^2}{2\Omega_s N\omega_s} \quad \text{Equation 2}$$

D'autre part la caractéristique du couple résistant en fonction du glissement est modélisée en utilisant la fonction suivante :

$$C_{\text{résistant}}(g) = ag^2 + bg + c. \quad \text{Equation 3}$$

La forme de l'Equation 3 est polynomiale. Cette forme, mathématiquement simple d'exploitation, convient à l'expression du couple de charge car il est en général proportionnel à la vitesse de rotation et à son carré en sus d'un couple statique possible.

En posant $C_{\text{résistant}}(g_{C_{\text{max}}}) = C_{\text{max}}$, on calcule la tension à la limite de décrochage :

$$\Rightarrow V_{\text{dec}} = \sqrt{\frac{2\Omega_s}{3} (N\omega_s) \left(a \left(\frac{R_r}{N\omega_s} \right)^2 + b \frac{R_r}{N\omega_s} + c \right)} \quad \text{Equation 4}$$

4 Influence de l'effet de peau sur un creux de tension

La modélisation de l'effet de peau a été élaborée dans le but d'affiner le modèle de la machine à induction lors du démarrage. Cependant la prise en compte de l'effet de peau influe également sur le comportement de la machine pendant l'apparition d'un creux de tension et le rétablissement de la tension.

4.1 Tension de décrochage

La valeur de la tension de décrochage est calculée à partir du couple résistant, du couple maximal de la machine et du glissement maximal. Or, la valeur du glissement maximal

dépend de l'effet de peau. En effet, le couple maximal est atteint pour : $\frac{R_r(g)}{g} = f_0$ avec

$f_0 = N\omega_s$ et dans le cas où la résistance dépend de l'effet de peau $R_r(g) = g.f(g) = k_3g^3 + k_2g^2 + k_1g + k_0$.

La valeur du glissement maximal est finalement une racine de l'équation du troisième degré en g qui s'écrit :

$$k_3g^3 + k_2g^2 + (k_1 - f_0)g + k_0 = 0 \quad \text{Equation 5}$$

Cette équation peut présenter au maximum 3 racines. La résolution est faite à partir des fonctions disponibles sur Matlab pour le calcul des racines d'un polynôme. Parmi les 3 solutions possibles, seules celles comprises entre 0 et 1 sont retenues. Dans le cas où plusieurs solutions sont comprises dans l'intervalle $[0;1]$, la valeur retenue est celle qui est la plus proche du glissement maximal calculé en l'absence d'effet de peau (Equation 1).

Soit $g'_{C_{\text{max}}}$ cette valeur. Le couple maximal est donné par :

$$C(g'_{C_{\text{max}}}) = \frac{3 * p * V_n^2}{\omega_s} \frac{1}{2 \sqrt{(R_s^2 + (N\omega_s)^2)}}$$

En posant $C_{résistant}(g'_{Cmax})=C_{max}$, la tension à la limite du décrochage s'exprime par :

$$V'_{dec} = \sqrt{\frac{2\Omega_s}{3}(\sqrt{R_s^2 + N^2\omega_s^2}) * (a(g'_{max})^2 + bg'_{max} + c)} \quad \text{Equation 6}$$

Afin d'illustrer cette démarche, on considère le moteur LS225ST. On calcule la tension de décrochage avec et sans prise en compte de l'effet de peau pour différents niveaux de charge. Dans un deuxième temps, on applique les deux tensions de décrochage calculées (avec et sans effet de peau) à un modèle de la machine du cinquième ordre avec prise en compte de l'effet de peau afin de vérifier la pertinence de la modélisation de la tension de décrochage.

Les différentes valeurs de tension de décrochage et leur courbes correspondantes sont résumés dans le tableau suivant .

Couple de charge Crésistant	Tension de décrochage avec effet de peau (entre phases)	Tension de décrochage sans effet de peau (entre phases)	Numéros de figures correspondantes
Cn	237V : creux de 40%	248V : creux de 38%	8, 9, 10 & 11
0.75*Cn	205V : creux de 48%	214V : creux de 46.5%	12, 13, 14 & 15
0.75*[Cn/(1-gn)](g-1)	184V : creux de 54%	207V : creux de 48.3%	16, 17, 18 & 19

4.1.1 1er Cas : Crésistant=Cn

4.1.1.1 U=237V (tension de décrochage avec prise en compte de l'effet de peau)

La Figure 8 et la Figure 9 présentent respectivement le couple électromagnétique et le glissement pendant un creux de tension de durée 2 secondes et d'amplitude égale à la tension de décrochage calculée à partir du modèle statique prenant en compte l'effet de peau.

La Figure 8, montre que pour une tension égale à la tension de décrochage calculée, la caractéristique du couple électromagnétique correspondante, est inférieure à la caractéristique du couple résistant. Donc la machine ne pourra pas trouver un point d'équilibre stable pendant le creux de tension et la condition de décrochage est vérifiée.

En effet, la Figure 9 montre que le glissement croît constamment pendant le creux de tension sans atteindre une valeur constante. A la fin du creux de tension le glissement atteint une valeur autour de 85%.

Couple électromagnétique pendant le creux

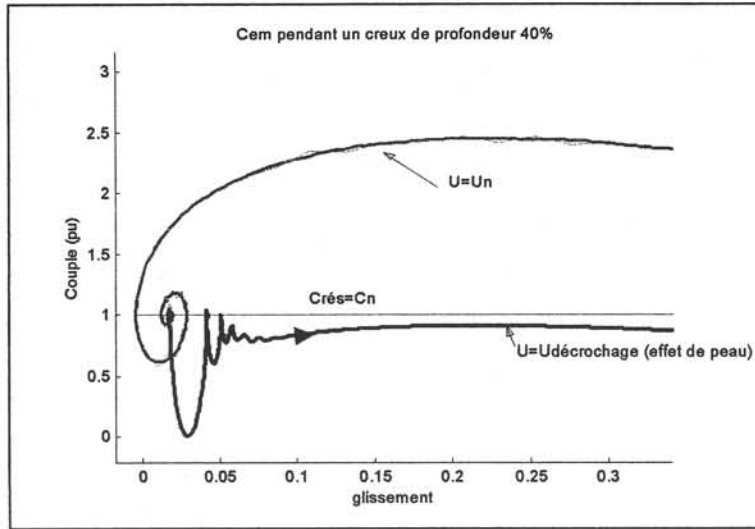


Figure 8 : Évolution du couple en fonction du glissement sous $U=237V$

Évolution du glissement pendant le creux

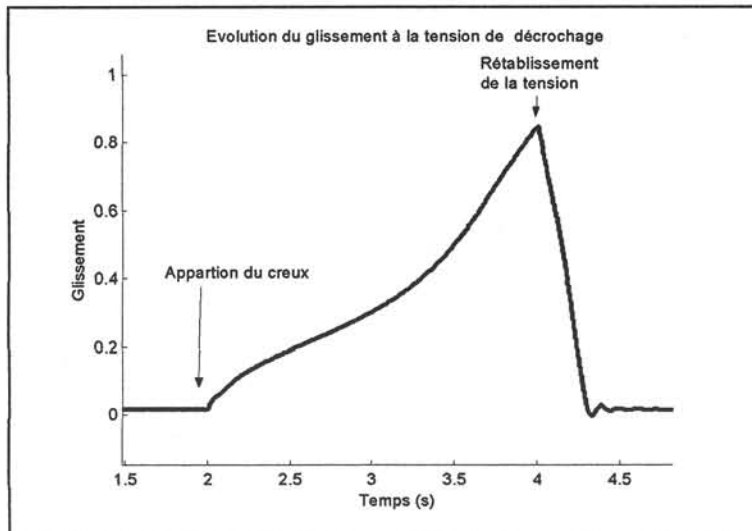


Figure 9 : Glissement pour $U=237V$

4.1.1.2 $U=248V$ (tension de décrochage sans prise en compte de l'effet de peau)

La Figure 10 et la Figure 11 présentent respectivement le couple électromagnétique et le glissement pendant un creux de tension de durée 2 secondes d'amplitude égale à la tension de décrochage calculée à partir du modèle statique ne prenant pas en compte l'effet de peau .

La Figure 10 montre que pour une tension égale à la tension de décrochage calculée sans la prise en compte de l'effet de peau, la caractéristique du couple électromagnétique et la

caractéristique du couple résistant se coupent en un point de la zone stable (autrement dit pour une valeur du glissement $< g_{max}$). Donc la machine va trouver un point d'équilibre stable pendant le creux de tension et ne décroche pas.

Finalement, la Figure 11 montre que le glissement tend asymptotiquement vers une valeur constante voisine de 0.2 quelque soit la durée du creux de tension.

Couple électromagnétique pendant le creux

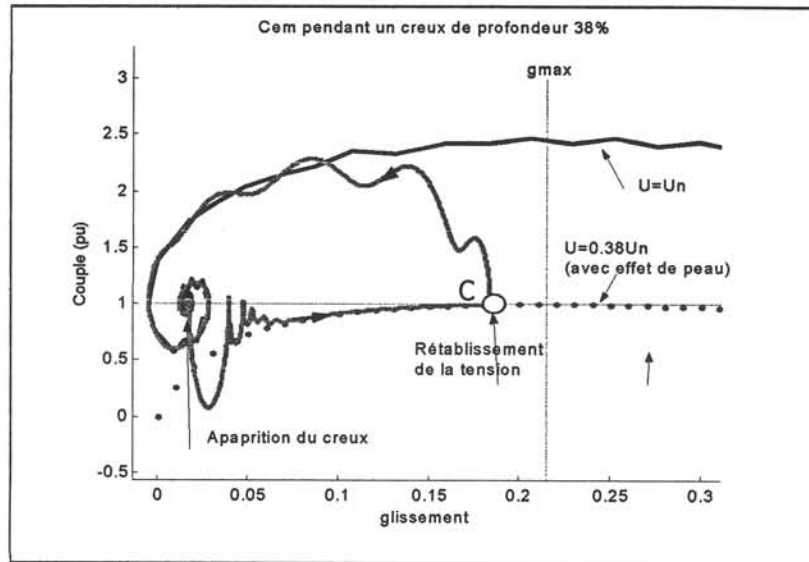


Figure 10 : Évolution du couple en fonction du glissement sous $U=248V$

Évolution du glissement pendant le creux

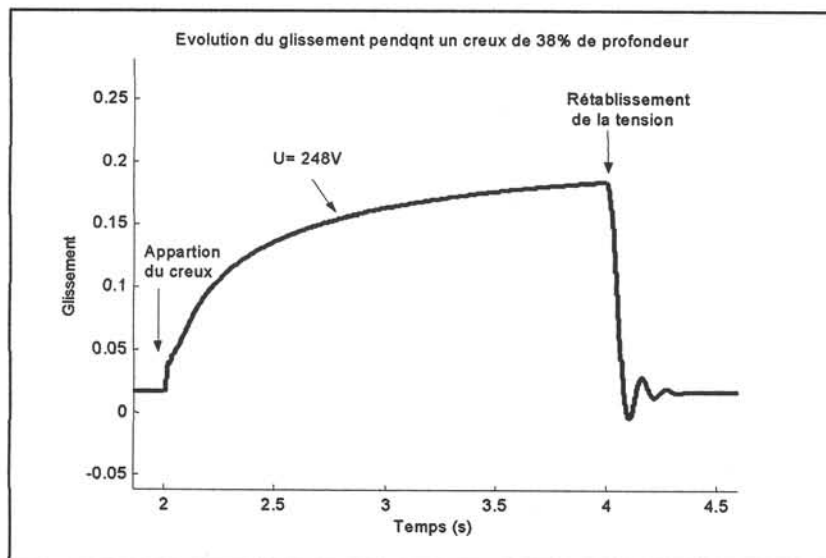


Figure 11 : Glissement pour $U=248V$

4.1.2 2ème Cas : Crésistant = 0.75Cn

4.1.2.1 U=205V (tension de décrochage : creux de 48% de profondeur)

La Figure 12 et la Figure 13 présentent respectivement le couple électromagnétique et le glissement pendant un creux de tension de durée 2 secondes et d'amplitude égale à la tension de décrochage calculée à partir du modèle statique prenant en compte l'effet de peau.

On vérifie bien que la condition de décrochage est vérifiée.

Couple électromagnétique pendant le creux

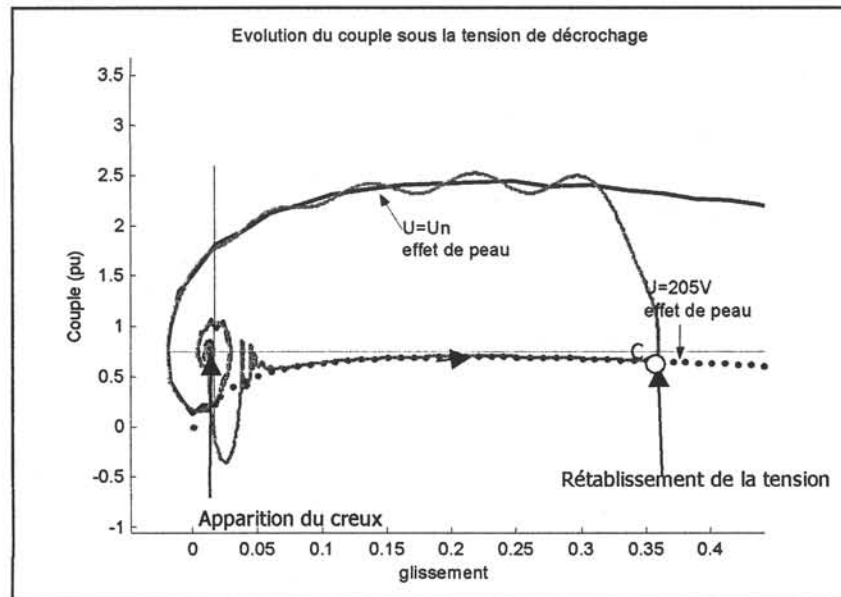


Figure 12: Évolution du couple en fonction du glissement sous U=205V

Évolution du glissement pendant le creux

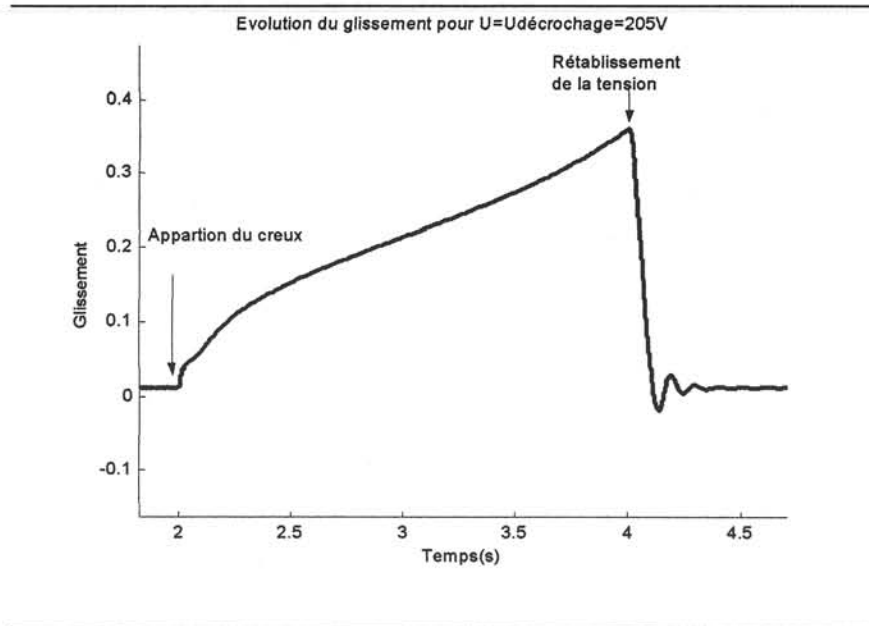


Figure 13 : Glissement pour $U=205V$

4.1.2.2 $U=214V$ (creux de 46.5% : tension de décrochage correspondant au calcul sans prise en compte de l'effet de peau)

La Figure 14 et la Figure 15 présentent respectivement le couple électromagnétique et le glissement pendant un creux de tension de durée 2 secondes et d'amplitude égale à la tension de décrochage calculée à partir du modèle statique ne prenant pas en compte l'effet de peau.

De la même manière que pour le premier cas, on vérifie que la machine ne décroche pas dans ce cas.

Couple électromagnétique pendant le creux

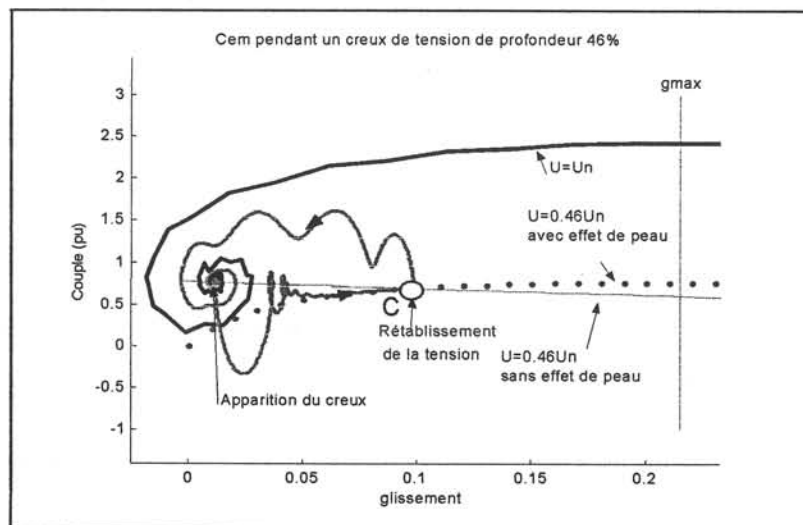


Figure 14 : Évolution du couple en fonction du glissement sous $U=205V$

Évolution du glissement pendant le creux

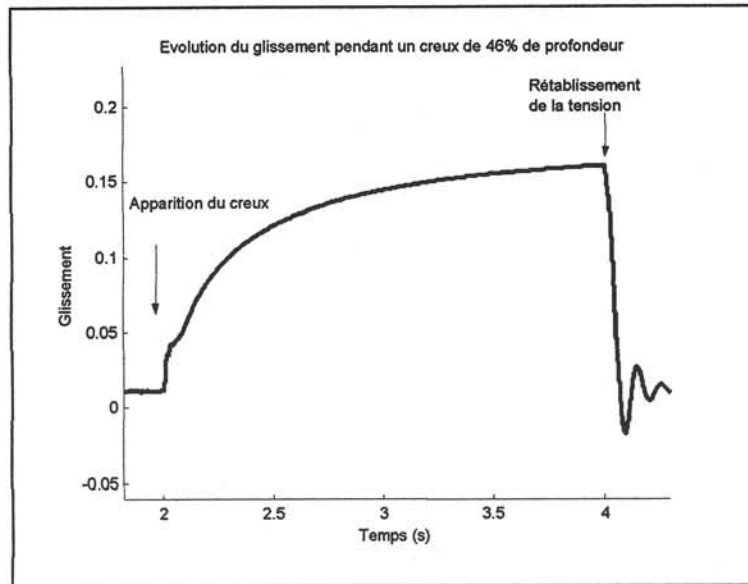


Figure 15: Glissement pour $U=215V$

4.1.3 3ième Cas : Crésistant = $k(1-g)$

Le même type d'analyse peut être fait que pour les deux cas précédents.

4.1.3.1 $U=184V$ (tension de décrochage : creux de 54% de profondeur)

Couple électromagnétique pendant le creux

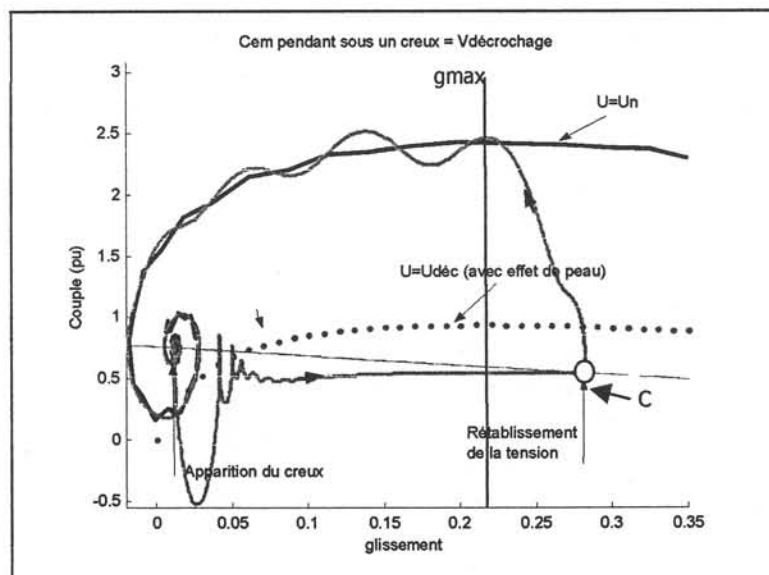


Figure 16 : Évolution du couple en fonction du glissement sous $U=184V$

Évolution du glissement pendant le creux

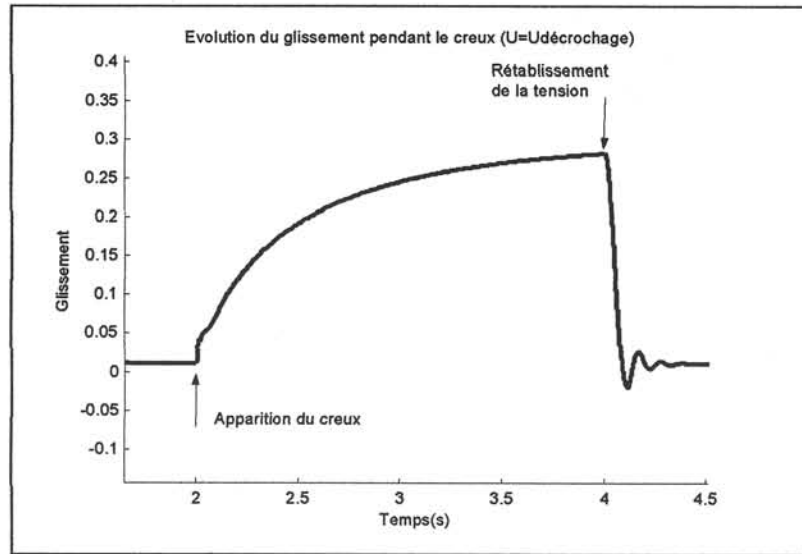


Figure 17 : Glissement pour $U=184V$

4.1.3.2 $U=207V$ (creux de 48.3% : tension de décrochage correspondant au calcul sans prise en compte de l'effet de peau)

Couple électromagnétique pendant le creux

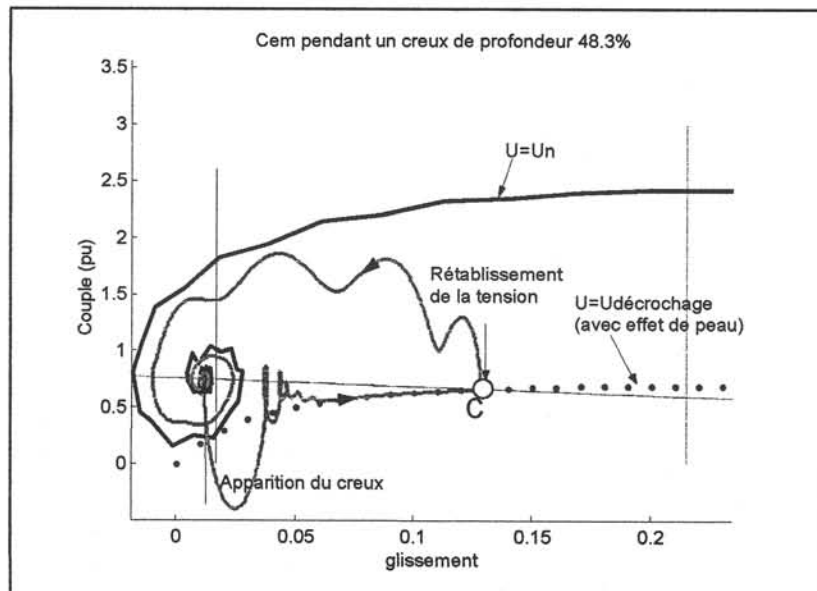


Figure 18 : Évolution du couple en fonction du glissement sous $U=207V$

Évolution du glissement pendant le creux

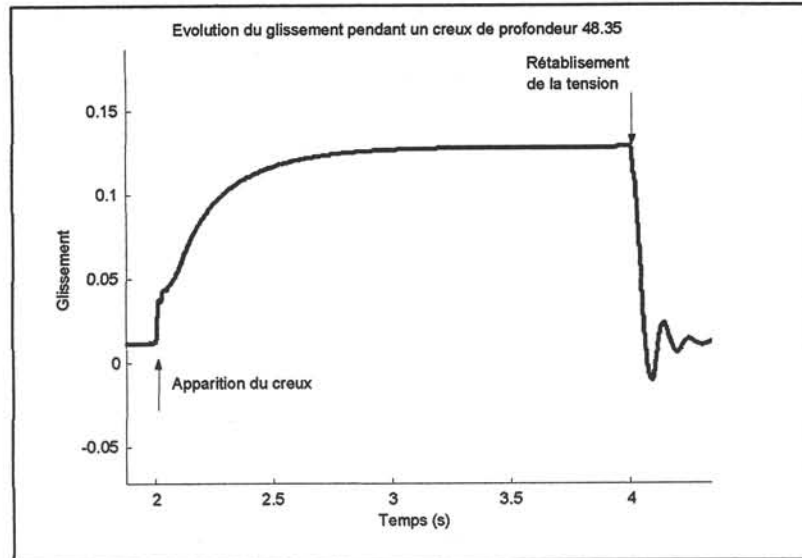


Figure 19 : Glissement pour $U=207V$

4.2 Variation de la résistance rotorique

Le paramètre principal dans la modélisation de l'effet de peau est la résistance rotorique. Dans ce paragraphe, on va donc examiner en détail les variations de la résistance rotorique en fonction du temps dans trois phases de fonctionnement :

1. Pendant le démarrage
2. Sous un creux de tension (avec et sans décrochage)
3. Au rétablissement de la tension

4.2.1 Au démarrage ($U=U_n=400V$)

La Figure 20 présente l'allure de la résistance rotorique pendant le démarrage pour les différents ordres de modélisation de la machine à induction .

Elle décroît depuis le début du démarrage pour atteindre une valeur constante égale à la valeur de la résistance rotorique R'_r correspondant au régime nominal de fonctionnement .

La résistance rotorique étant fonction du glissement, sa variation diffère selon l'ordre utilisé. Les premier et second ordre occultent les oscillations observées avec les troisième et cinquième ordre.

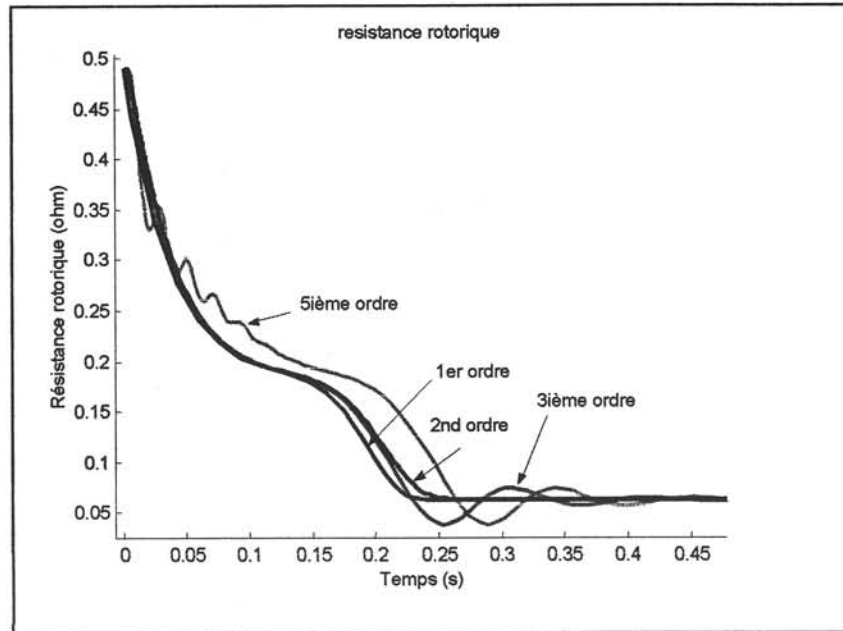


Figure 20 : Variation de la résistance rotorique pendant le démarrage

4.2.2 Pendant un creux de tension de 40% de profondeur (260V, f=50Hz)

La Figure 21 présente l'évolution du glissement pendant un creux de 40% de profondeur, pour les différents ordres de modélisation. D'un point de vue général, la valeur de la résistance croît, pour atteindre une valeur constante relative au nouveau point de fonctionnement sous le creux de tension.

Cependant, comme pendant le démarrage, les ordres 1 et 2 présentent un régime transitoire plus rapide et moins oscillant que les ordres 3 et 5. Cela s'explique toujours par la dépendance étroite entre les variations de la résistance rotorique et l'évolution transitoire du glissement.

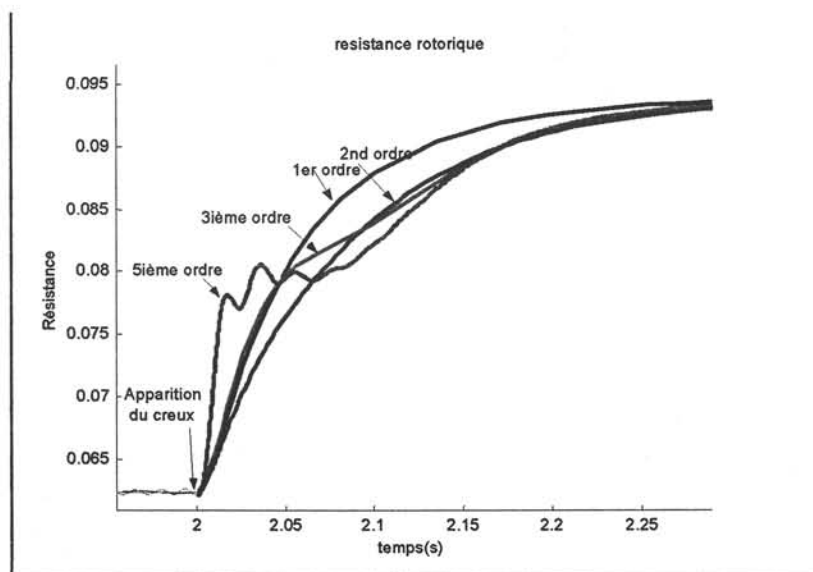


Figure 21 : Variation de la résistance rotorique pendant un creux de tension

La Figure 22 présente, pour les différents ordres, l'évolution du glissement pendant un décrochage. La valeur de la résistance croît pour atteindre au maximum la valeur correspondant à un glissement égal à 1. Mais dans ce cas le rétablissement a eu lieu avant que la résistance ne retrouve la valeur qu'elle avait au début du démarrage (voir Figure 20).

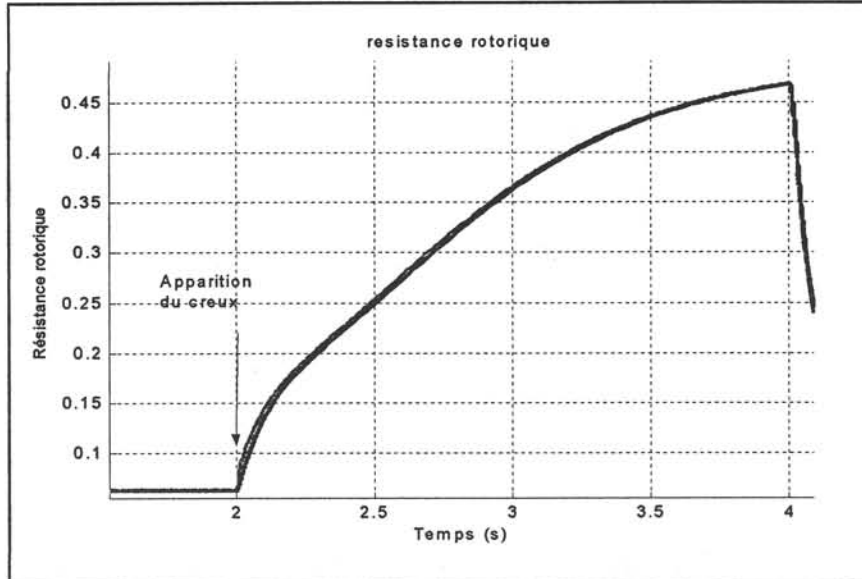


Figure 22 : Variation de la résistance rotorique pendant une coupure (creux de profondeur 100%)

4.2.3 Au rétablissement

La Figure 23 et la Figure 24 présentent respectivement, pour les différents ordres, l'évolution du glissement pendant le rétablissement de la tension après un creux de 40% de profondeur (Figure 23) et après un décrochage (Figure 24). La valeur de la résistance décroît pour atteindre la valeur correspondant au régime de fonctionnement final. Enfin, de même que pendant le démarrage et le creux, les ordres 1 et 2 présentent un régime transitoire plus rapide et moins oscillant que les ordre 3 et 5.

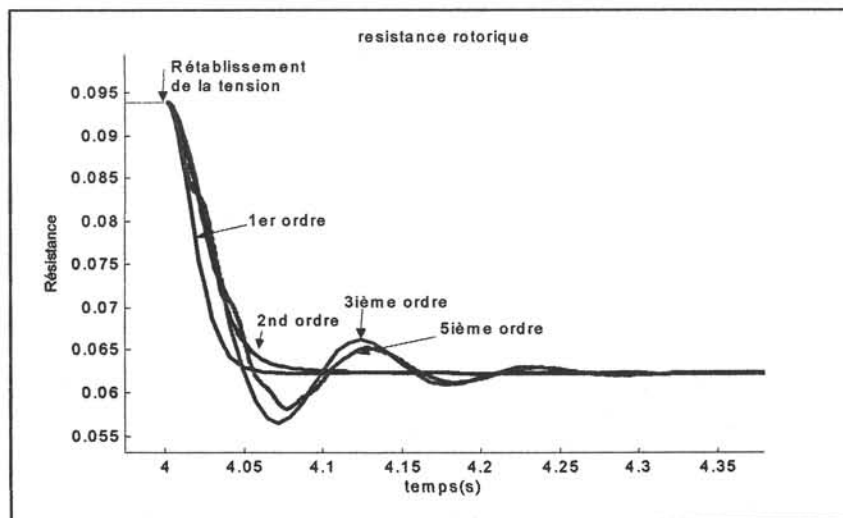


Figure 23 : Résistance rotorique au rétablissement de la tension après un creux de 40% de profondeur

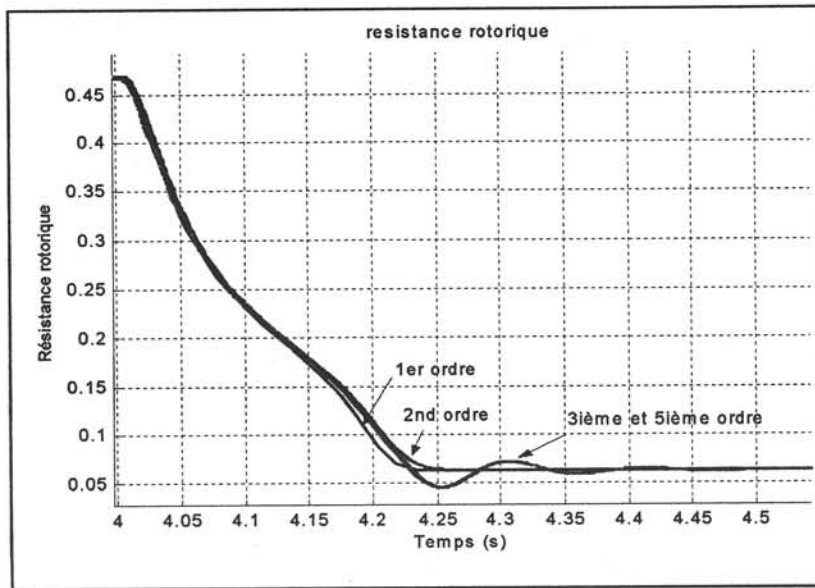


Figure 24 : Variation de la résistance rotorique au rétablissement après une coupure (creux de profondeur 100%)

4.3 Influence de l'effet de peau sur l'allure du couple pendant un creux de tension

Afin d'étudier l'influence de la prise en compte de l'effet de peau pendant un creux de tension, deux cas de figures seront présentés :

1. Simulation pendant un creux de 40 % de profondeur et d'une durée de 0.5 s avec un modèle du cinquième ordre de la machine à induction :
 - sans prise en compte de l'effet de peau.
 - avec prise en compte de l'effet de peau

2. Simulation pendant un creux de 100% de profondeur et d'une durée de 1 s avec un modèle du cinquième ordre de la machine à induction :
 - sans prise en compte de l'effet de peau.
 - avec prise en compte de l'effet de peau

Les figures qui suivent permettent de comparer l'allure du couple électromagnétique dans les deux cas, à l'apparition du creux et au rétablissement de la tension.

La Figure 25 et la Figure 26 présentent l'allure du couple pendant un creux et au rétablissement de la tension, avec et sans prise en compte de l'effet de peau. La profondeur du creux est de 40 %. Les deux courbes sont assez comparables.

Même en appliquant un creux plus profond ($V=0$), l'écart entre les courbes reste négligeable comme le montre la Figure 27.

Cependant, la Figure 28 montre qu'au moment du rétablissement de la tension les deux courbes ne sont plus comparables. En effet plus le creux est profond, plus la caractéristique du couple électromagnétique au rétablissement est proche de celle au démarrage. L'influence de l'effet de peau sur l'allure du couple au rétablissement est donc particulièrement sensible (valeur du couple maximum et instant où cette valeur est atteinte).

Couple électromagnétique en fonction du temps pour un creux de 40% de profondeur

A l'apparition du creux (de profondeur 40%)

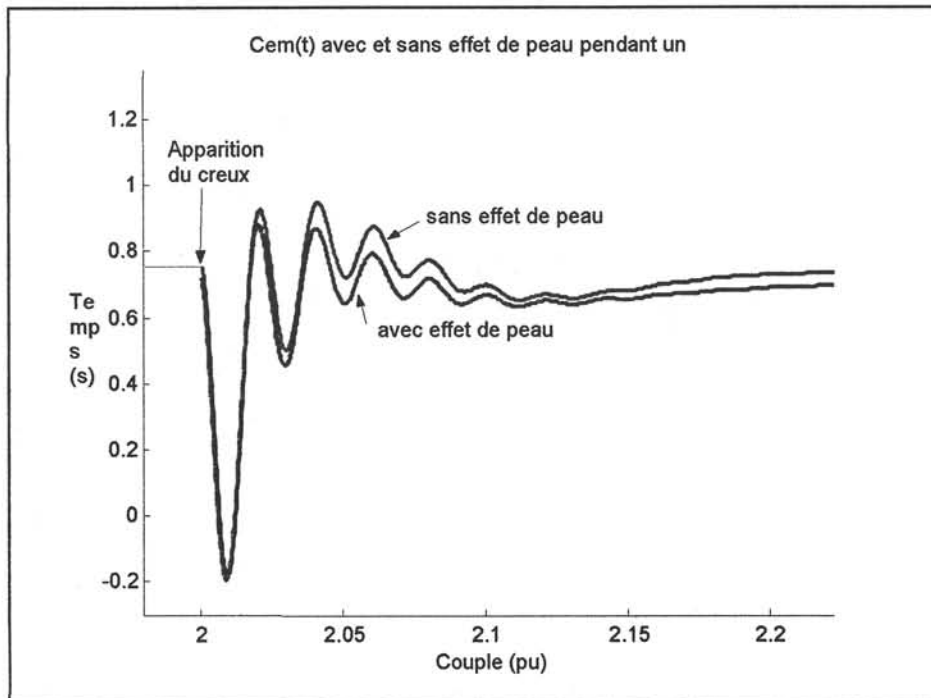


Figure 25 : Couple électromagnétique en fonction du temps à l'apparition d'un creux avec et sans prise en compte de l'effet de peau

Au rétablissement de la tension

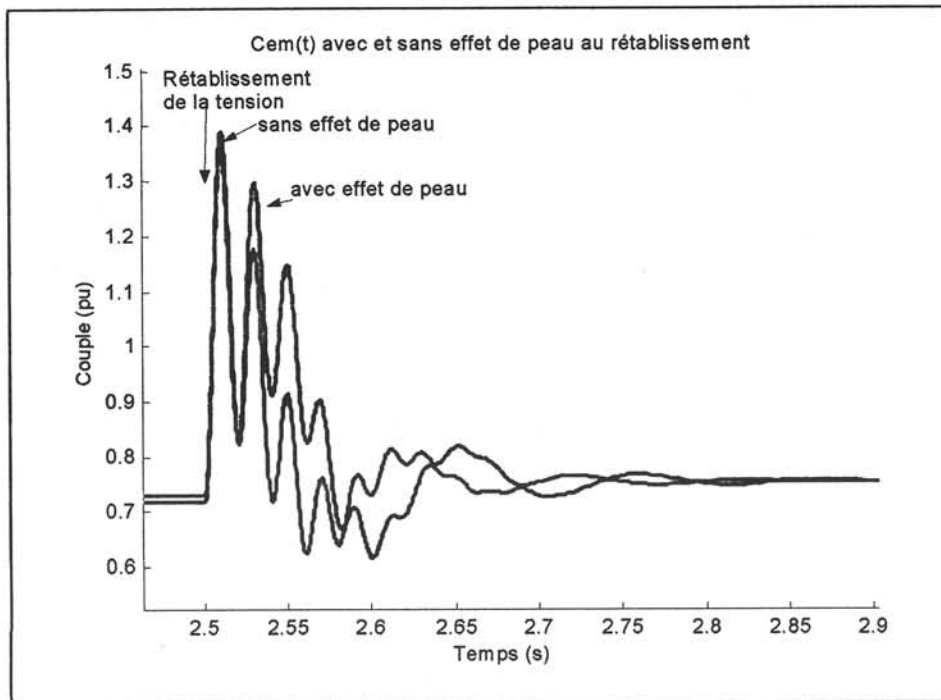


Figure 26 Couple électromagnétique en fonction du temps au rétablissement de la tension avec et sans prise en compte de l'effet de peau

Couple électromagnétique en fonction du temps pour un creux de 100% de profondeur (V=0)

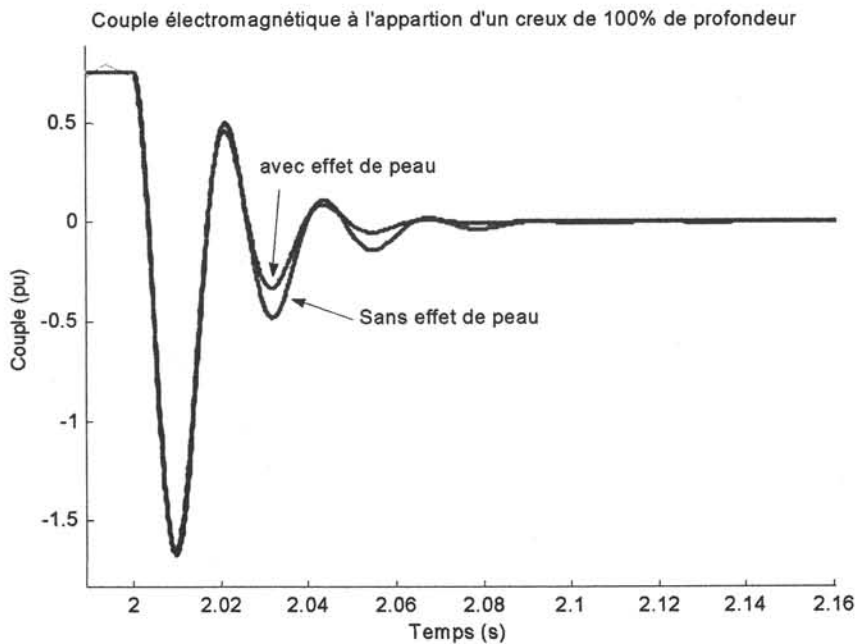


Figure 27 : Couple électromagnétique en fonction du temps à l'apparition d'un creux de 100% de profondeur avec et sans prise en compte de l'effet de peau

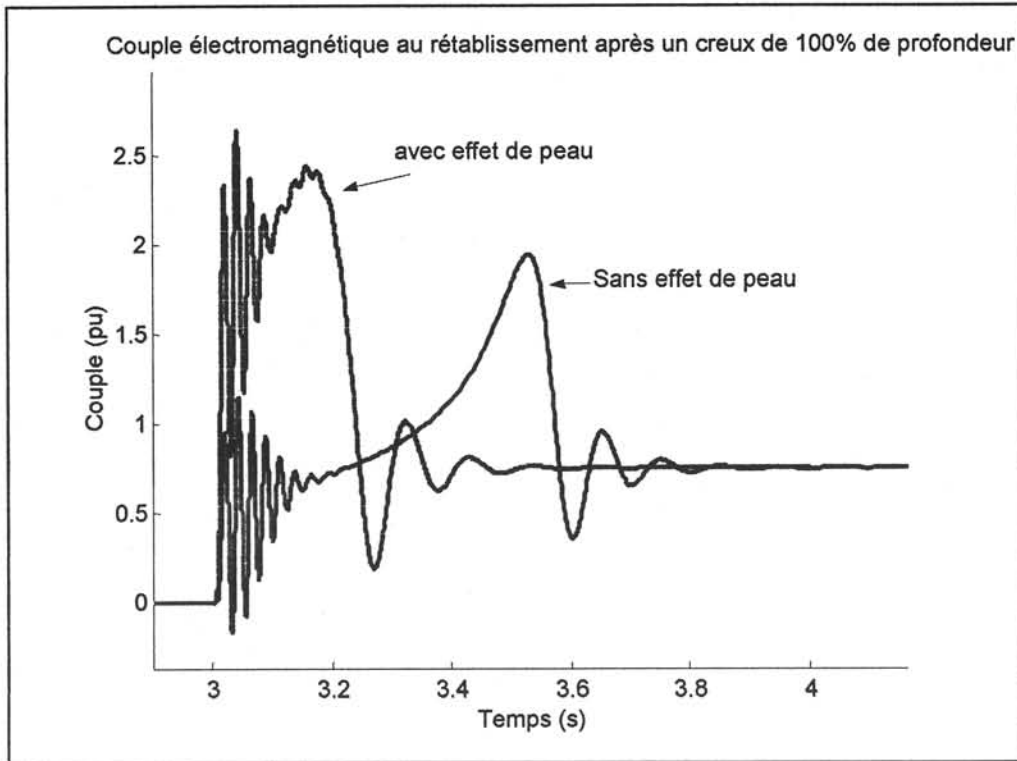


Figure 28 : Couple électromagnétique en fonction du temps au rétablissement de la tension après un creux de 100% de profondeur avec et sans prise en compte de l'effet de peau

4.4 Conclusion

La modélisation de l'effet de peau s'avère indispensable pour l'étude du comportement de la machine à induction, non seulement lors des démarrages, mais également pendant les creux de tension sur les machines à induction.

En effet, d'une part, elle conduit à un calcul plus cohérent de la valeur de la tension de décrochage de la machine alors que la valeur déduite sans la modélisation de l'effet de peau ne provoque pas nécessairement le décrochage de la machine.

D'autre part, plus le creux est profond, plus la modélisation de l'effet de peau est importante pour simuler le rétablissement de la tension.

5 Comparaison des différents ordres de modélisation

Les différents modèles de machine à induction proposés sont comparés à partir de simulations sous Matlab. Leurs performances sont détaillées avec prise en compte l'effet de peau et pour trois régimes de fonctionnement : pendant le démarrage, pendant un creux d'une profondeur de 40% et finalement pendant le rétablissement de la tension.

5.1 Au démarrage

5.1.1 Couple électromagnétique

La simulation du comportement de la machine à induction pendant la phase de démarrage (sous la tension nominale ($U_n=400V$, $f=50Hz$)) varie selon l'ordre de modélisation utilisé.

La Figure 29 présente l'évolution du couple électromagnétique en fonction du glissement pour les quatre ordres (1^{er}, 2nd, 3^{ième} et 5^{ième}).

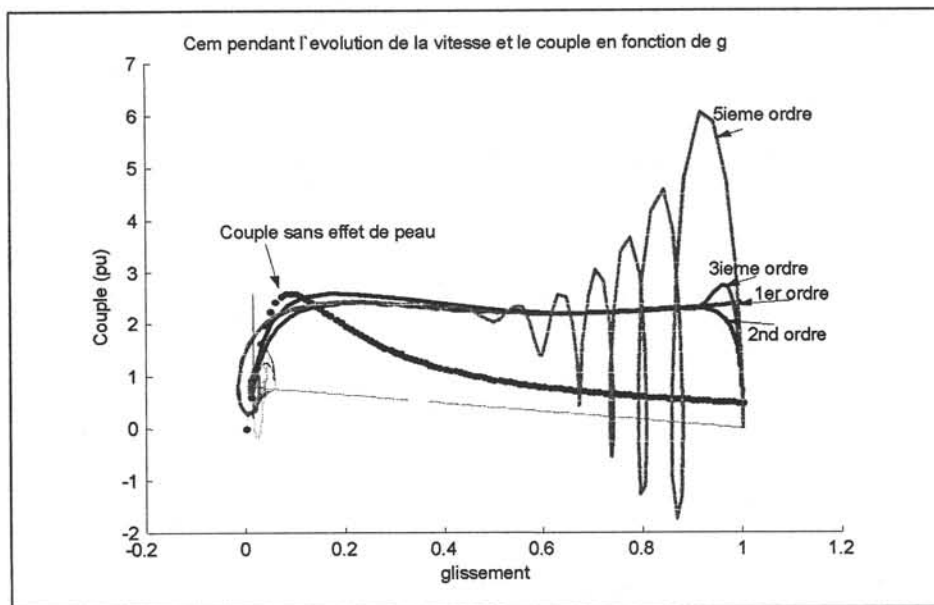


Figure 29: Évolution du couple électromagnétique en fonction du glissement

La Figure 30 présente l'évolution du couple électromagnétique en fonction du temps pour les quatre ordres (1^{er}, 2nd, 3^{ième} et 5^{ième}).

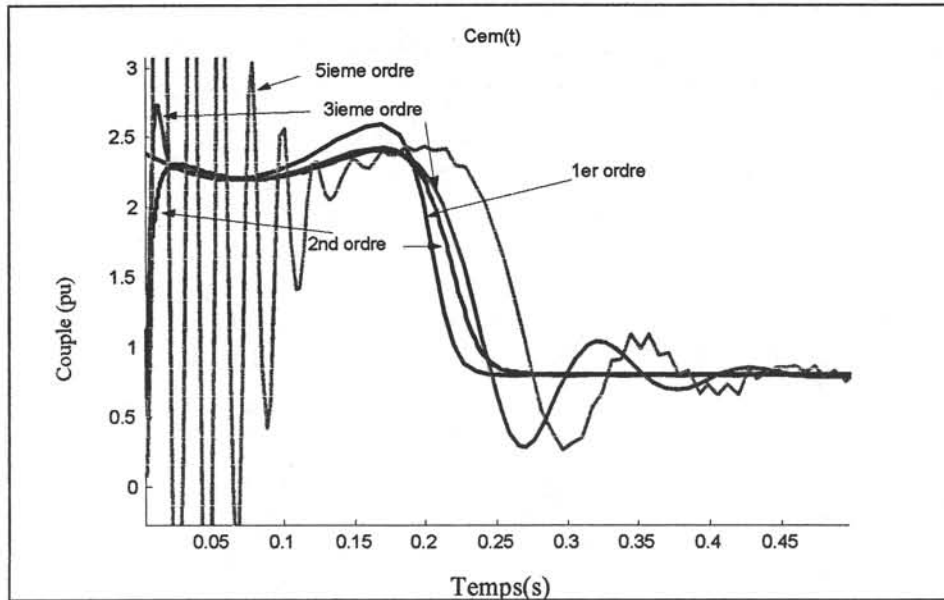


Figure 30: Évolution du couple électromagnétique en fonction du temps

La caractéristique correspondant au modèle du 5^{ième} ordre prend en compte les transitoires électriques statorique et rotorique. Elle reproduit les oscillations du couple à partir de $g=1$ jusqu'au régime permanent. Les autres modèles sont issus d'hypothèse de séparation plus ou moins poussée des modes, les modes les plus rapides étant supposés avoir atteint instantanément leur régime stationnaire. Ce régime stationnaire est alors introduit dans la(es) dynamique(s) "lente(s)" du système avec une réduction d'ordre conséquente. Le troisième et le second ordre sont assez comparables. Par contre, le modèle du premier ordre présente une caractéristique qui diffère, notamment lors du passage par la valeur du couple maximal puisque la valeur atteinte est supérieure à celle donnée par les trois autres modèles.

Or, la valeur du couple maximal est un paramètre déterminant pour la stabilité dynamique de la machine à induction, car elle définit la zone instable. Afin de mieux étudier ce phénomène on va comparer les valeurs du couple maximal données par le modèle du 5^{ième} ordre pour diverses charges. La Figure 31 présente l'évolution du couple électromagnétique en fonction du temps, pour les valeurs de couple résistant suivantes : C_n , $0,7C_n$, $0,5C_n$, $0,2C_n$ et 0. La valeur du couple maximal reste presque constante pour les cinq différentes charges, donc elle ne varie pas avec la valeur du couple de charge et dépend essentiellement des caractéristiques de la machine.

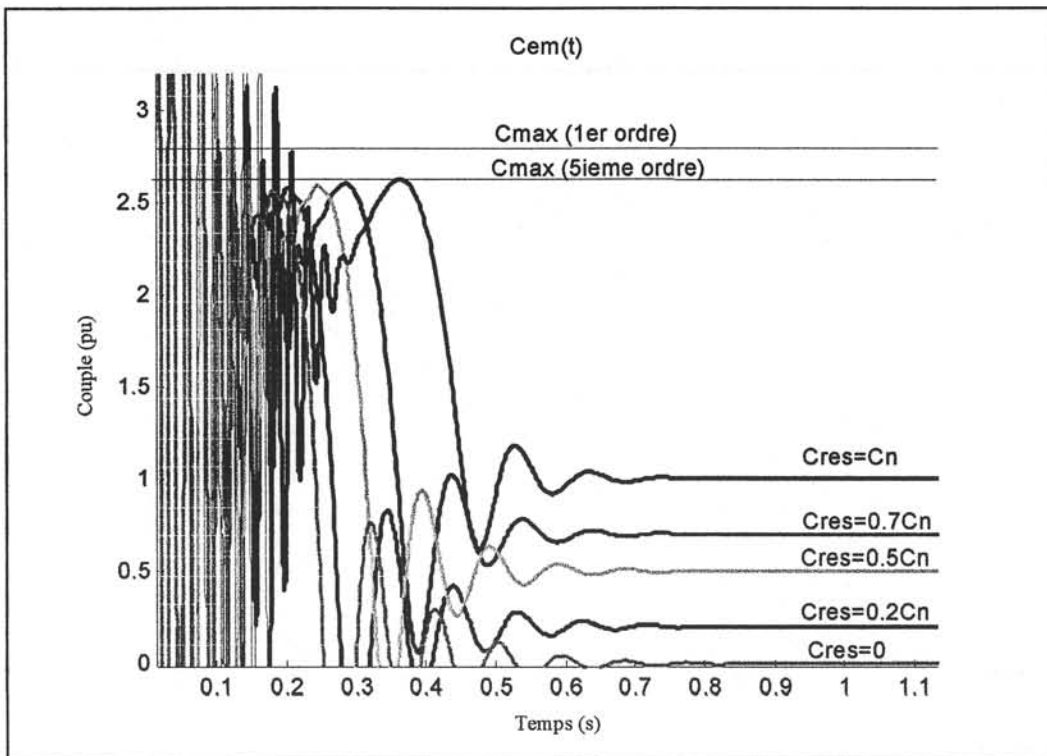


Figure 31: Couple électromagnétique en fonction du temps pour différentes charges

Il apparaît, en fait, que la différence dans la valeur du couple maximal est due à l'importance de la variation des grandeurs électriques rotorique au voisinage de cette valeur. En effet, comme le montre la Figure 32, l'évolution du flux rotorique, présente la plus grande variation au moment où le glissement passe par g_{max} (dans ce cas vers $t=0.2s$ - voir Figure 30). Le fait de négliger le transitoire rotorique à cet instant précis engendre donc un important décalage dans la valeur du couple électromagnétique. C'est le cas du modèle du 1^{er} ordre.

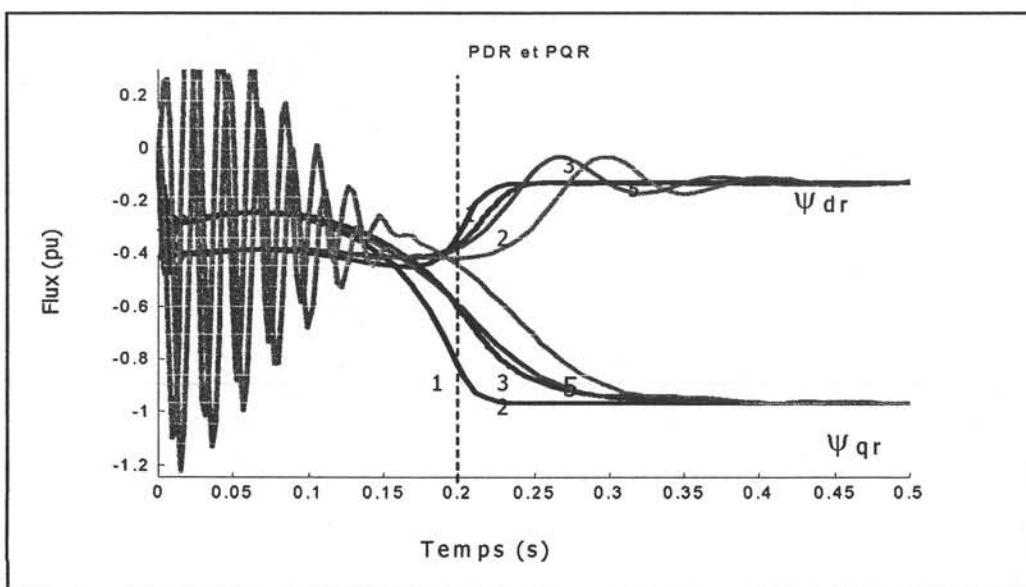


Figure 32: Variation du flux rotorique en fonction du temps pour les différents ordres

5.1.2 Variation de vitesse

L'établissement de la vitesse de rotation de la machine à induction depuis le démarrage est représentée Figure 33 pour les différents ordres.

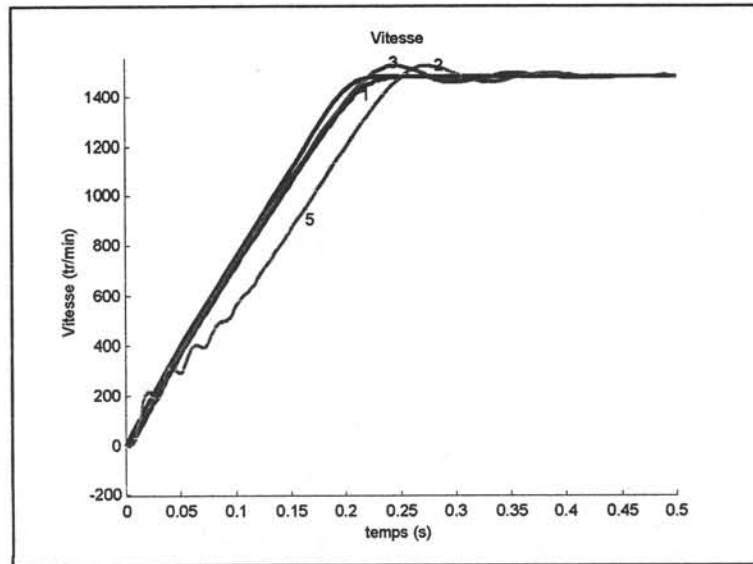


Figure 33: Évolution de la vitesse pour les différents ordres

Le temps d'établissement de la vitesse est le facteur principal qui varie selon l'ordre utilisé pour la simulation. Ainsi pour le 5^{ème} ordre, la durée du régime transitoire est plus grande relativement aux ordres inférieurs. De même les oscillations de la vitesse autour de la valeur d'équilibre sont occultées par les modèles du premier et du second ordre. Cependant du point de vue de l'ordre de grandeur, le modèle du second ordre reste fiable et représente un bon compromis.

Pendant la phase de démarrage	5 ^{ème} ordre	3 ^{ème} ordre	2 nd ordre	1 ^{er} ordre
Oscillations au démarrage	importantes	faibles	Inexistantes	Inexistantes
Valeur du couple maximal atteint	Même ordre de grandeur que pour 2 nd et 3 ^{ème} ordre	Même ordre de grandeur que pour 5 ^{ème} et 2 nd ordre	Même ordre de grandeur que pour 5 ^{ème} et 3 ^{ème} ordre	C_{max} nettement supérieur aux 3 autres cas
Durée du régime transitoire	La plus grande	Inférieure au 5 ^{ème} ordre	Inférieure au 3 ^{ème} et 5 ^{ème} ordre	La plus faible

5.2 Creux de tension de profondeur 40% (U=260V, f=50Hz)

On applique aux différents ordres un creux de tension de 40% de profondeur et d'une durée de 300ms.

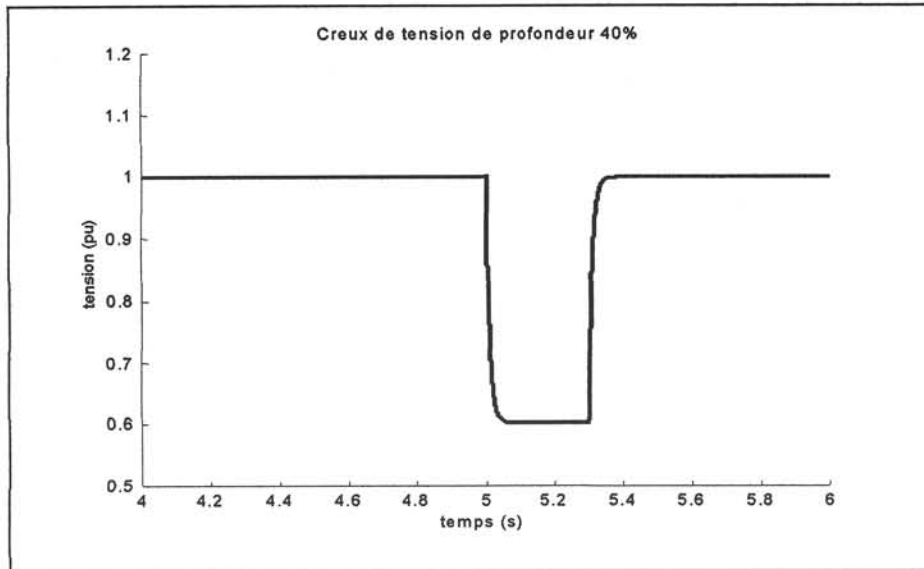


Figure 34: Allure de l'amplitude de la tension (creux de 40%)

5.2.1 Couple électromagnétique

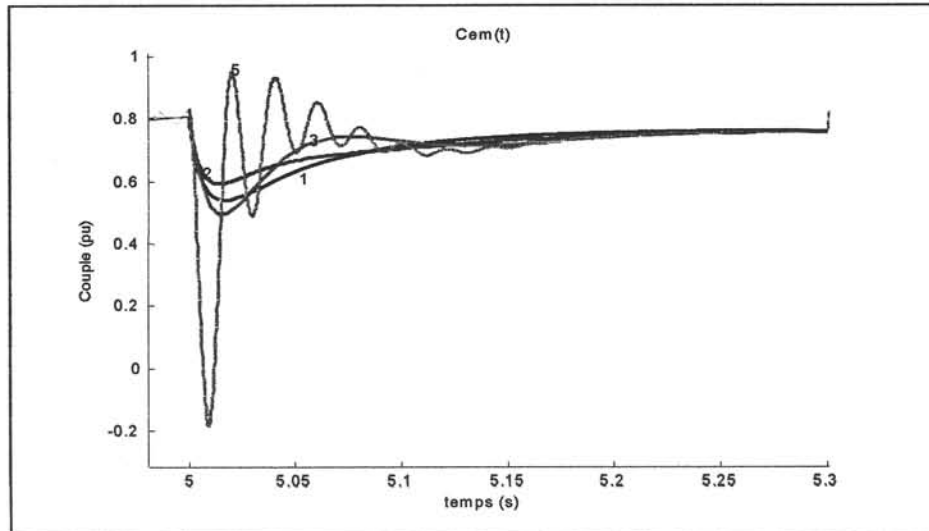


Figure 35: Couple électromagnétique pendant le creux de tension pour les différents ordres

A l'apparition d'un creux de tension, le couple électromagnétique passe par un état transitoire avant de trouver un nouveau point de fonctionnement correspondant au point de concours entre le couple résistant et la caractéristique du couple électromagnétique pour la tension de creux. Le modèle du cinquième ordre présente des oscillations qui ne sont pas observées dans les modèles d'ordre inférieur.

5.2.2 Vitesse de rotation

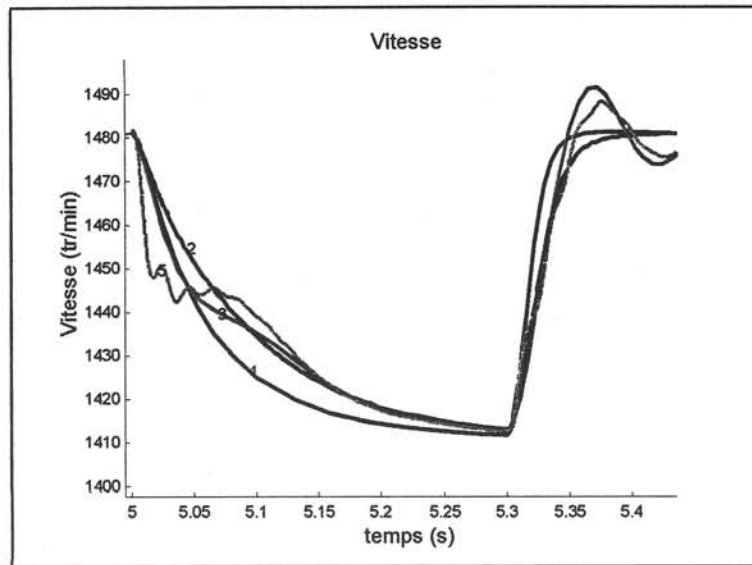


Figure 36: Évolution de la vitesse pendant le creux de tension

Pendant le creux de tension, la vitesse décroît comme le montre la Figure 36. Les oscillations pendant la variation de la vitesse qui est une grandeur mécanique ne diffèrent pas trop d'un modèle à un autre.

Pendant un Creux	5 ^{ème} ordre	3 ^{ème} ordre	2 nd ordre	1 ^{ère} ordre
Oscillations	importantes	faibles	pas d'oscillation	pas d'oscillation
Durée du transitoire électrique	$Te5 > Te3 > Te2$			
Durée du transitoire mécanique	$Tm5 > Tm3 > Tm2 > Tm1$			

5.3 Au décrochage

Tension de décrochage pour les différents ordres de modélisation sans effet de peau

On considère le moteur LS 225ST décrit dans le chapitre III § 3.2 entraînant une charge produisant un couple variable avec la vitesse et égal à 75% du couple nominal à la vitesse nominale.

La tension de décrochage est calculée à partir du modèle du 1^{er} ordre sans effet de peau. Elle vaut 49%.

On compare maintenant les simulations correspondant à l'application d'un creux de profondeur 49% et d'une durée de 2 secondes.

Modèle du premier ordre

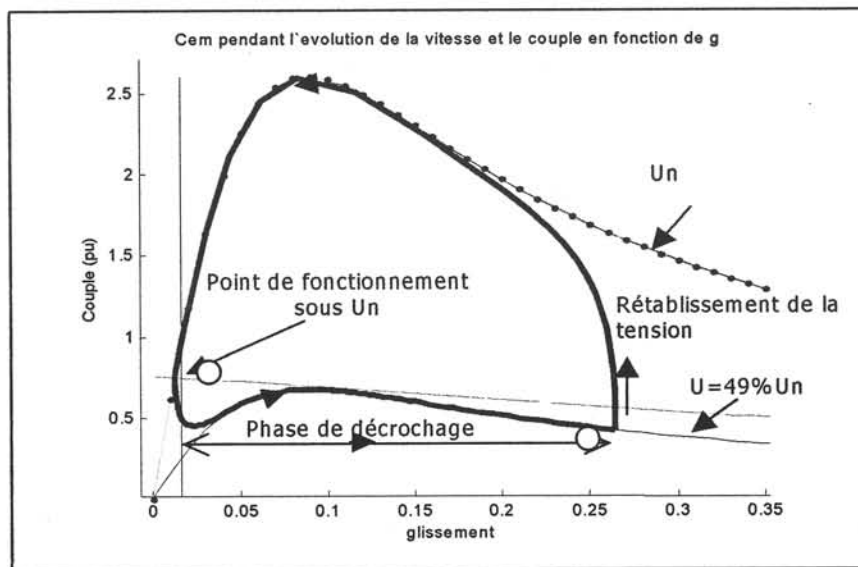


Figure 37: couple pour $U_{\text{décrochage}}$ pour un modèle du 1^{er} ordre

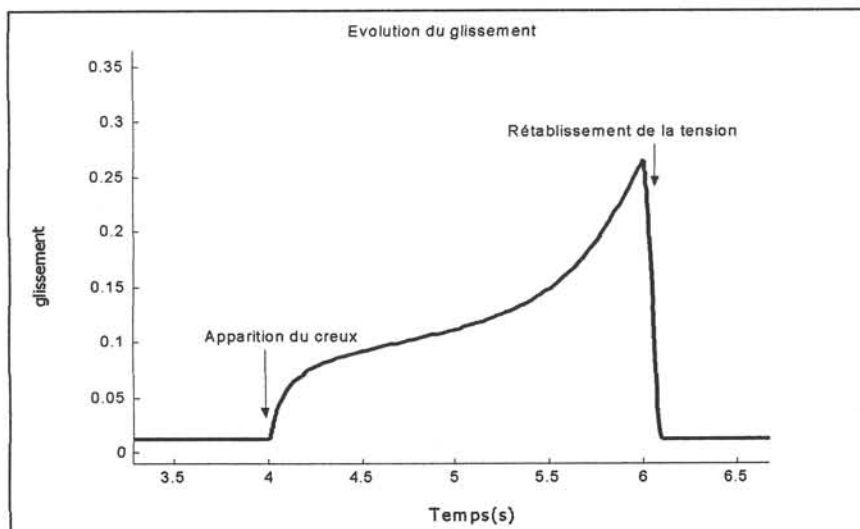


Figure 38 : glissement au décrochage pour un modèle du 1er ordre

Modèle du second ordre

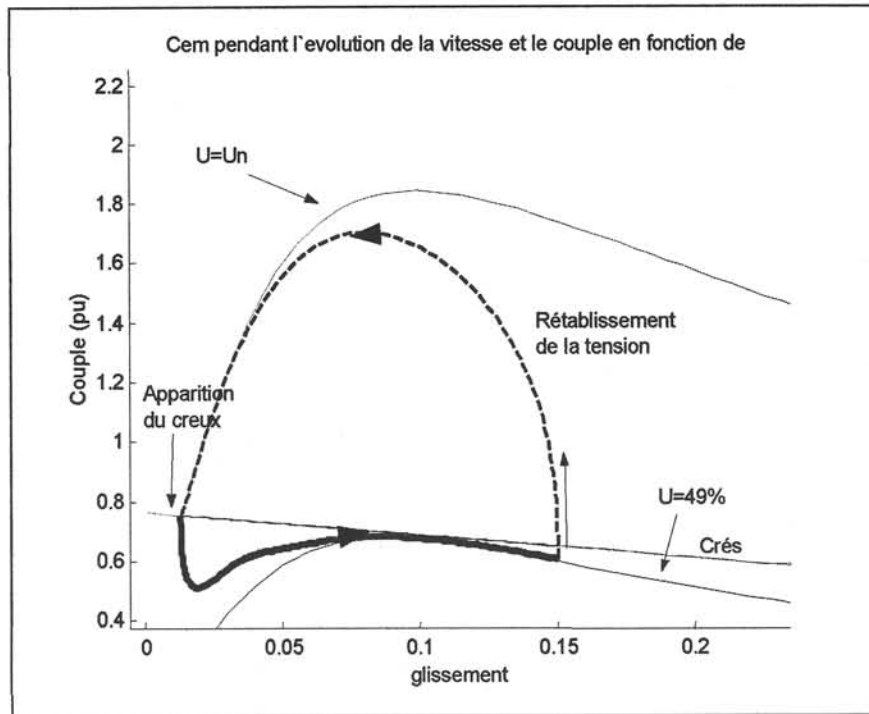


Figure 39: couple au décrochage pour un modèle du 2nd ordre

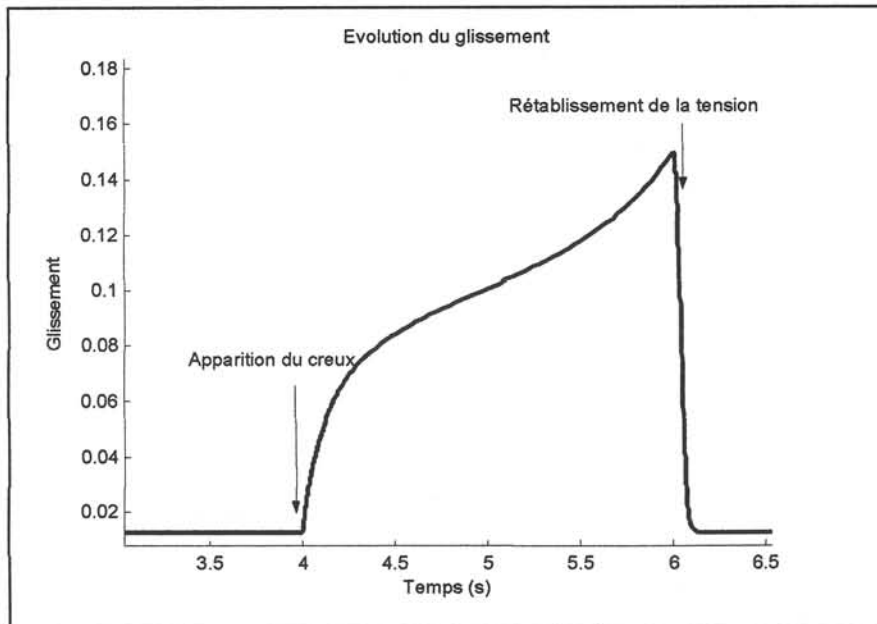


Figure 40: glissement au décrochage pour un modèle du 2nd ordre

Modèle du troisième ordre

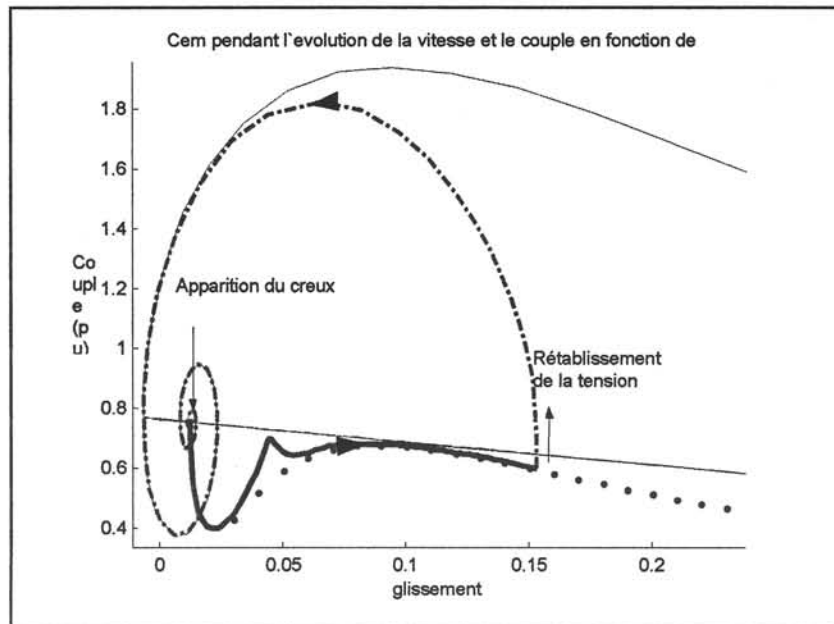


Figure 41: couple au décrochage pour un modèle du 3^{ème} ordre

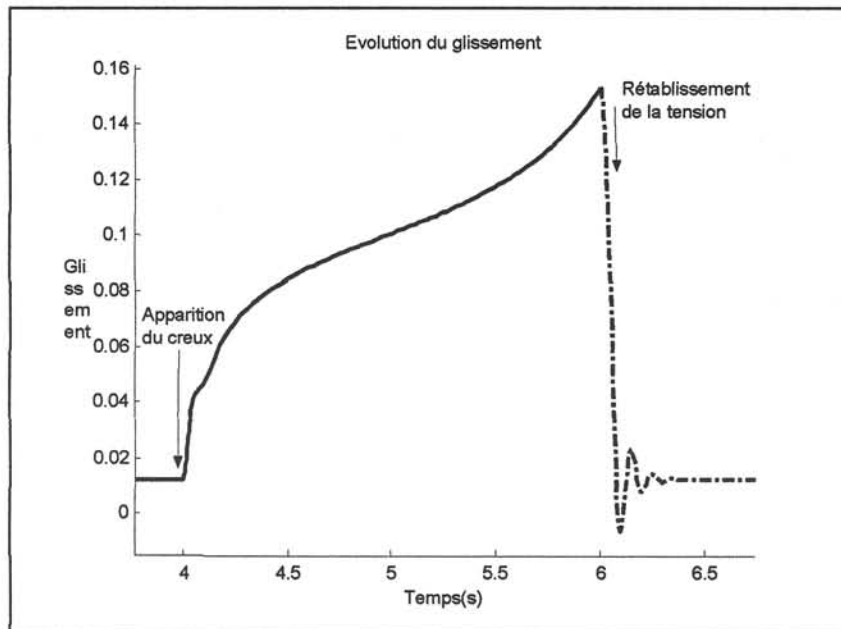


Figure 42: glissement au décrochage pour un modèle du 3^{ème} ordre

Modèle du cinquième ordre

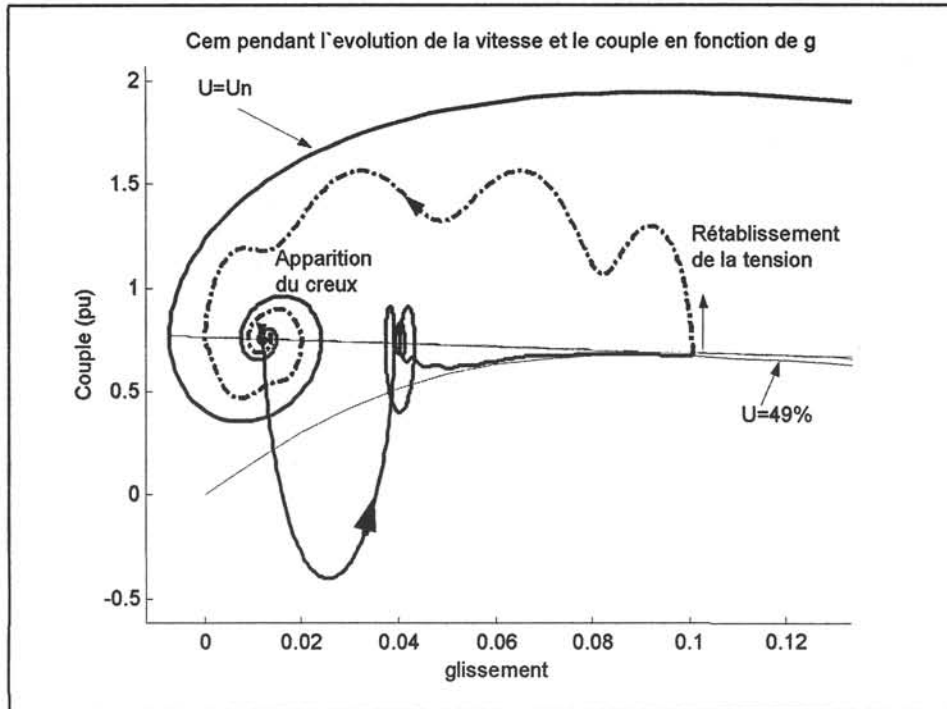


Figure 43: couple au décrochage pour un modèle du 5^{ème} ordre

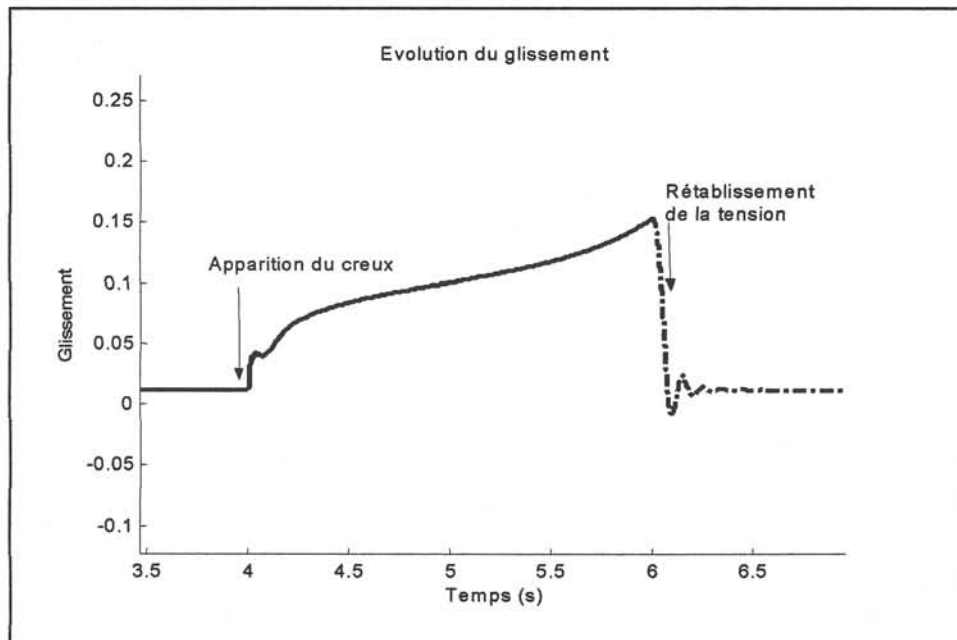


Figure 44: glissement au décrochage pour un modèle du 5^{ème} ordre

D'après les figures précédentes (de la Figure 37 à la Figure 44), la valeur de le tension de décrochage calculée avec le modèle du premier ordre demeure vraie en l'appliquant aux ordres supérieurs. Cependant, la valeur du glissement après un creux de 49% et d'une durée de 2s est de 26.5% pour le modèle du 1^{er} ordre alors que la valeur obtenue pour le même creux avec les ordres supérieurs est d'environ 15%. Une raison à cette relative concordance des différents ordres de modélisation est qu'une fois le régime nominal atteint, les transitoires des grandeurs électriques de la machine ne sont pas aussi importants que lors d'un démarrage. Finalement, ils sont comparables, quelque soit l'ordre de modélisation, à ceux donnés par le modèle du 1^{er} ordre.

Par contre, en simulant le même creux de tension avec un modèle prenant en compte l'effet de peau, le décrochage n'a pas obligatoirement lieu comme le montrent les figures Figure 45 et Figure 46. Ceci s'explique par le fait que le couple maximal a lieu pour un glissement g_{max} supérieur à celui calculé avec le modèle qui ne tient pas compte de l'effet de peau. Le modèle avec effet de peau présente finalement une plus large zone de stabilité.

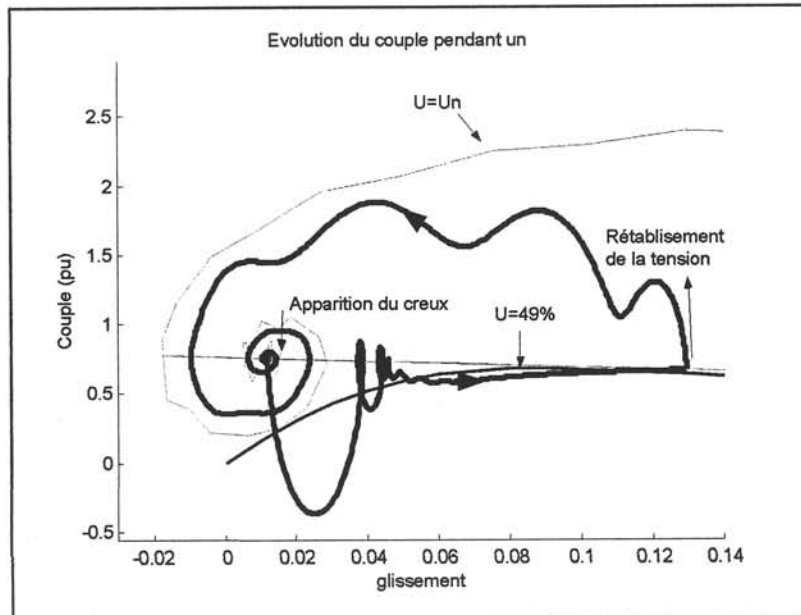


Figure 45: Couple pour un creux de 49% (modèle du 5^{ème} avec effet de peau)

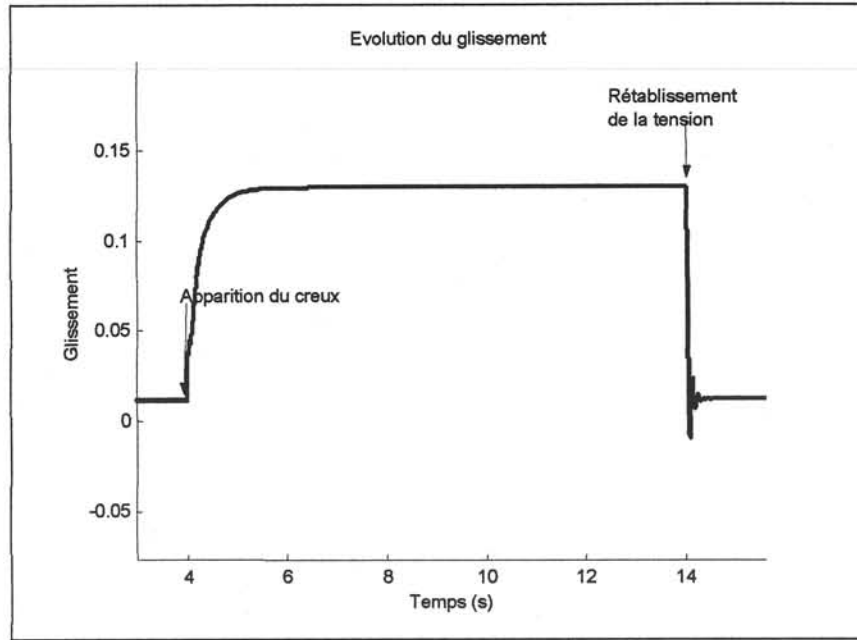


Figure 46: glissement pour un creux de 49% (modèle du 5^{ème} avec effet de peau)

Au décrochage	Sans effet de peau				Avec effet de Peau
	5 ^{ème} ordre	3 ^{ème} ordre	2 nd ordre	1 ^{er} ordre	
Tension de décrochage	Même valeur $V_{\text{décrochage}}$ pour tous les ordres				$V_{\text{décrochage}} >$ valeur calculée sans effet de peau

5.4 Au rétablissement de la tension

Couple électromagnétique

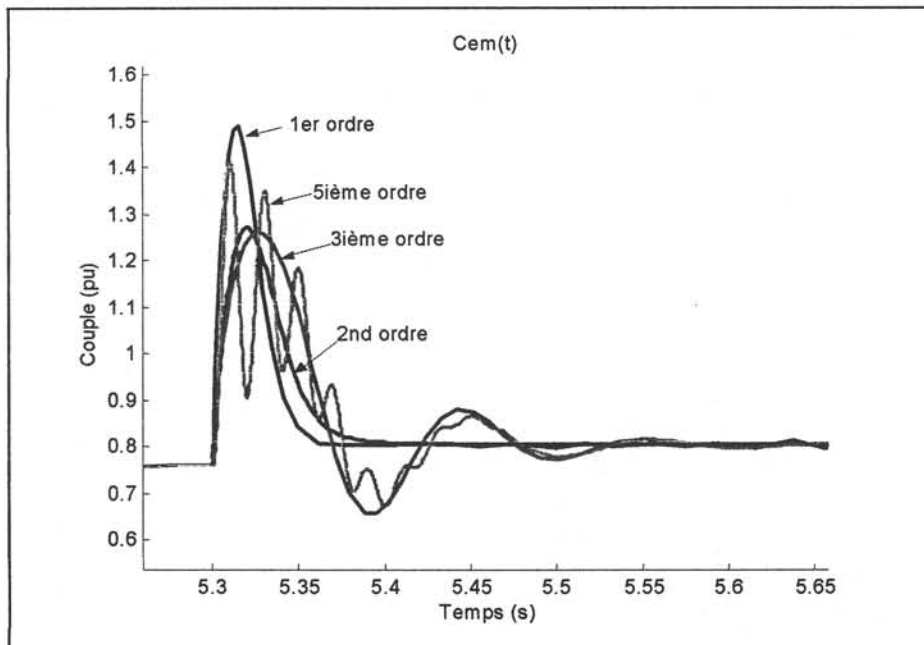


Figure 47 : Évolution du couple en fonction du temps pendant le rétablissement

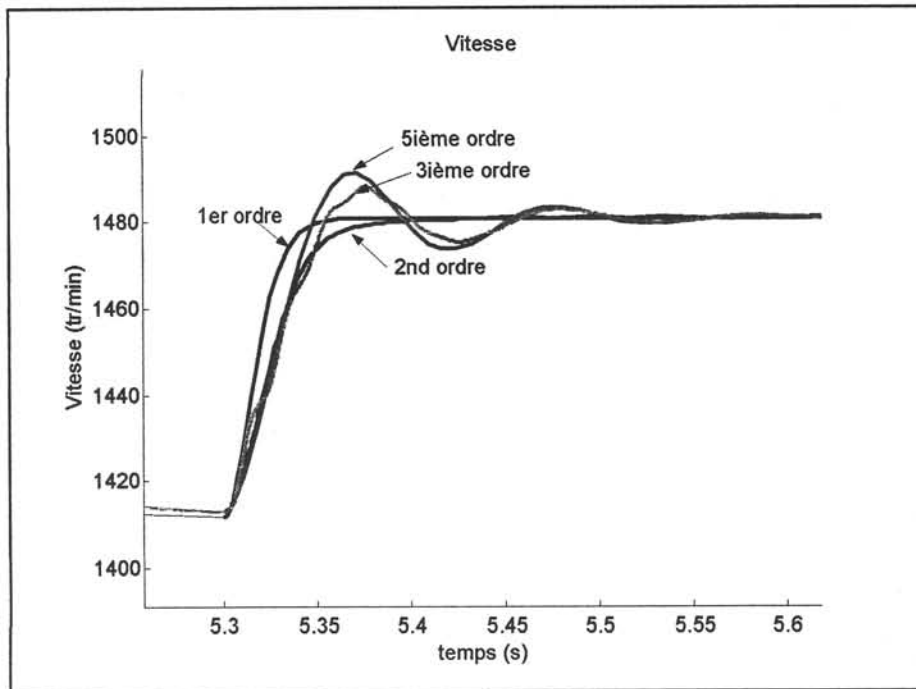


Figure 48: Évolution de la vitesse pendant le rétablissement

Au rétablissement	5 ^{ième} ordre	3 ^{ième} ordre	2 nd ordre	1 ^{ère} ordre
Oscillations	importantes	faibles	Pas d'oscillation	Pas d'oscillation
Durée du régime transitoire électrique	$T_{e5} > T_{e3} > T_{e2}$			
Durée du régime transitoire mécanique	$T_{m5} > T_{m3} > T_{m2} > T_{m1}$			

6 Comparaisons des effets des creux équilibrés et déséquilibrés sur les machines à induction

Afin de comparer les conséquences des creux triphasés, biphasés et monophasés, des simulations sur Matlab sont effectuées pour différentes profondeurs de creux de tension, triphasé, biphasé et monophasé. Le modèle du second ordre de la machine à induction est utilisé.

Comparaison d'un creux de tension triphasé équilibré et d'un creux monophasé de profondeur égale à 40% ($U=260V$, $f=50Hz$) et d'une durée de 1s :

Couple électromagnétique en fonction du temps :

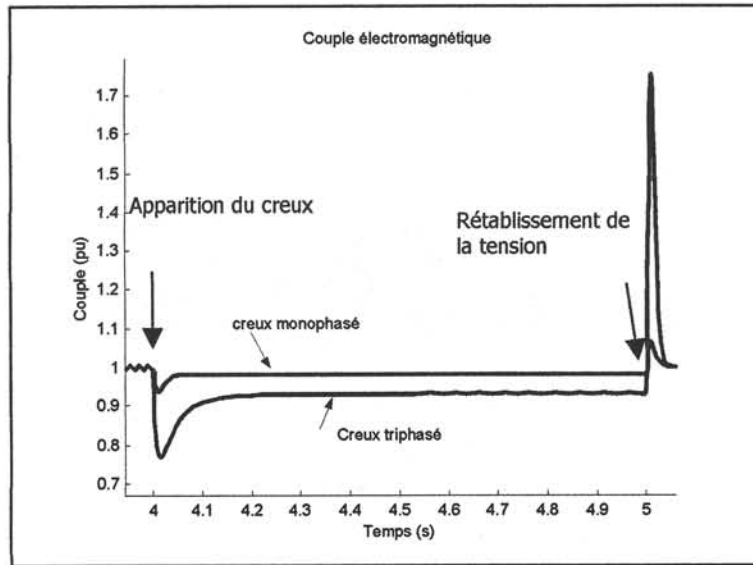


Figure 49: Évolution du couple électromagnétique pendant les creux de tension (mono et triphasé)

Glissement en fonction du temps :

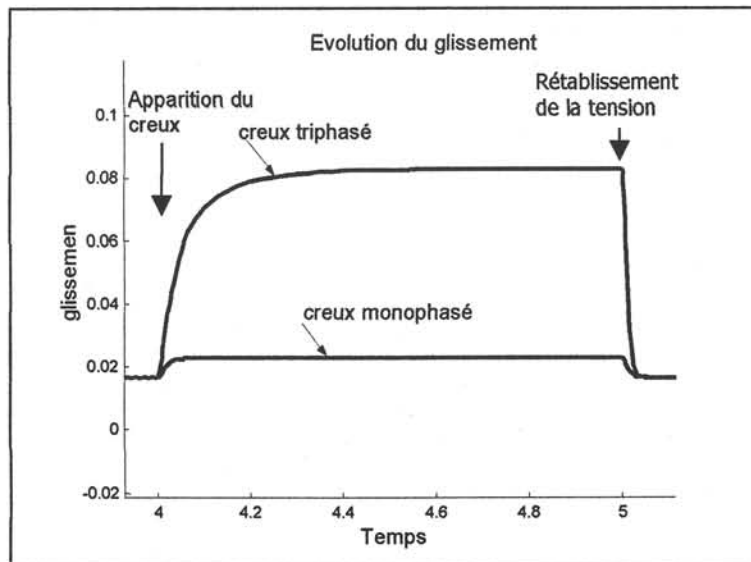


Figure 50: Évolution du glissement pendant les creux de tension (mono et triphasé)

Comparaison d'un creux de tension triphasé équilibré et d'un creux biphasé de profondeur égale à 40% et d'une durée de 1s :

Couple électromagnétique en fonction du temps :

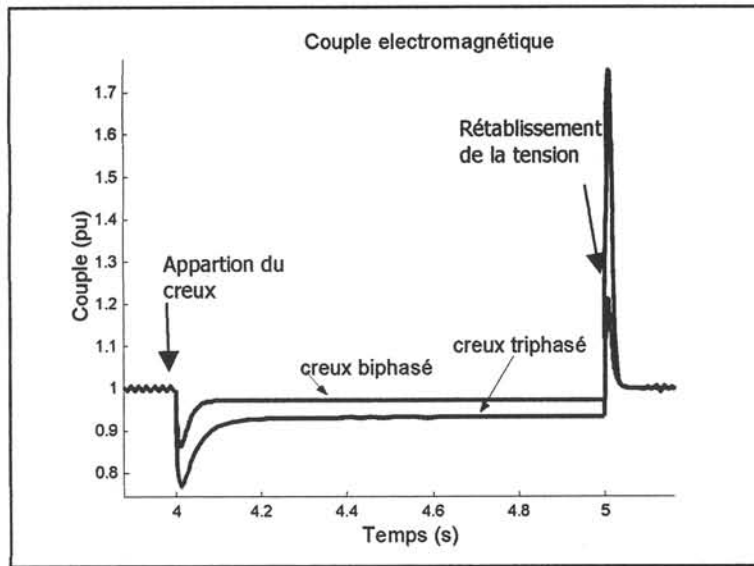


Figure 51: Évolution du couple électromagnétique pendant les creux de tension(biphasé et triphasé)

Glissement en fonction du temps

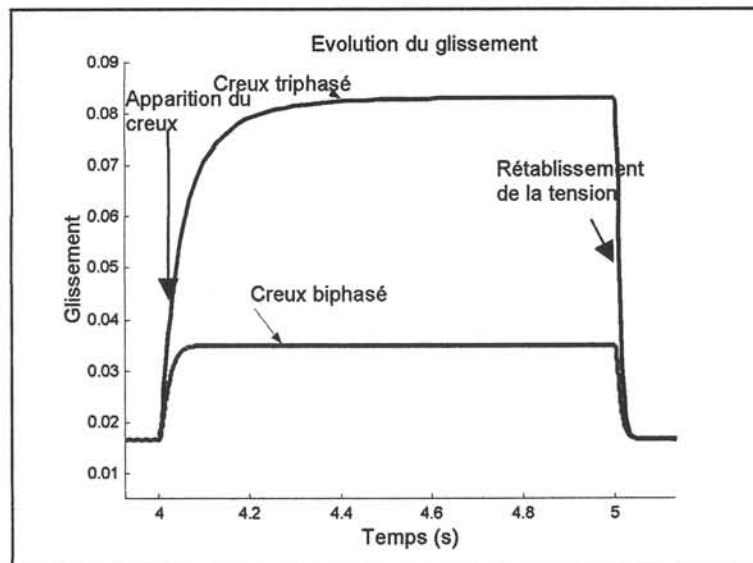


Figure 52: Évolution du glissement pendant les creux de tension(biphasé et triphasé)

Comparaison d'une coupure de tension triphasée et d'une coupure monophasée

Couple électromagnétique en fonction du temps :

Les figures suivantes montrent le comportement de la machine (couple et glissement) pendant une coupure monophasée (creux monophasé de 100%) et pendant une coupure triphasée (creux triphasé de 100%).

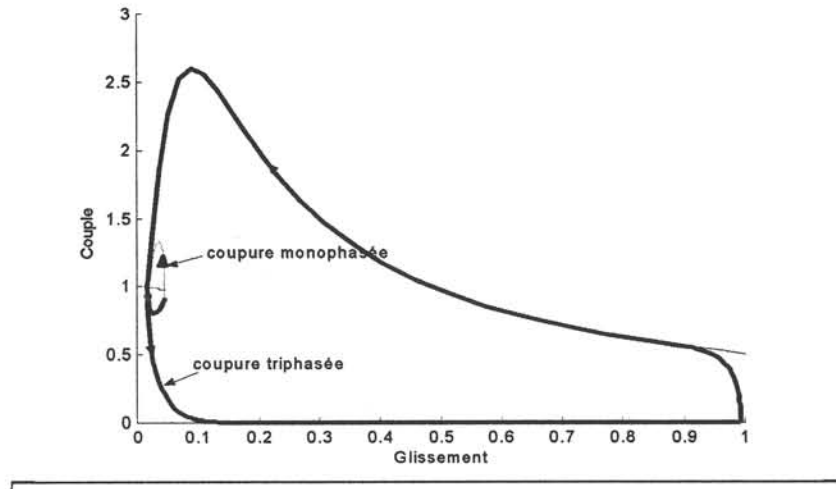


Figure 53: Évolution du couple pendant une coupure de tension triphasée et monophasée (creux de 100% de profondeur)

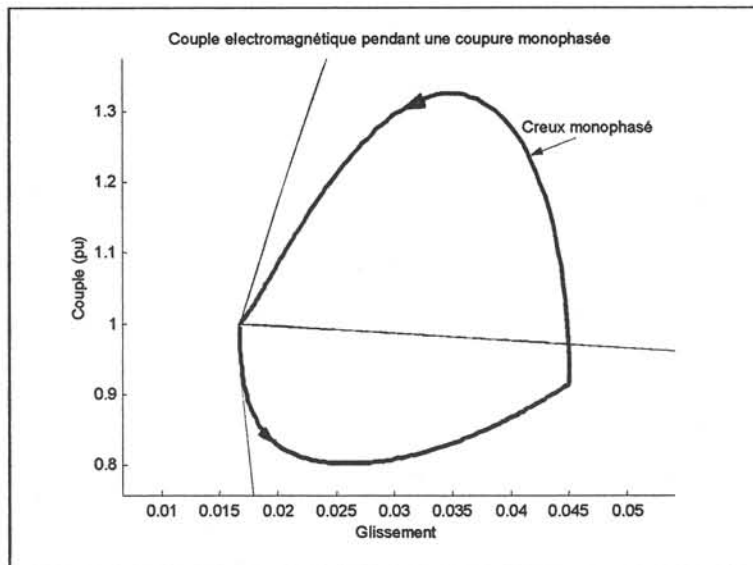


Figure 54 : Couple électromagnétique pendant une coupure monophasée (creux monophasé de profondeur 100%)

Glissement en fonction du temps

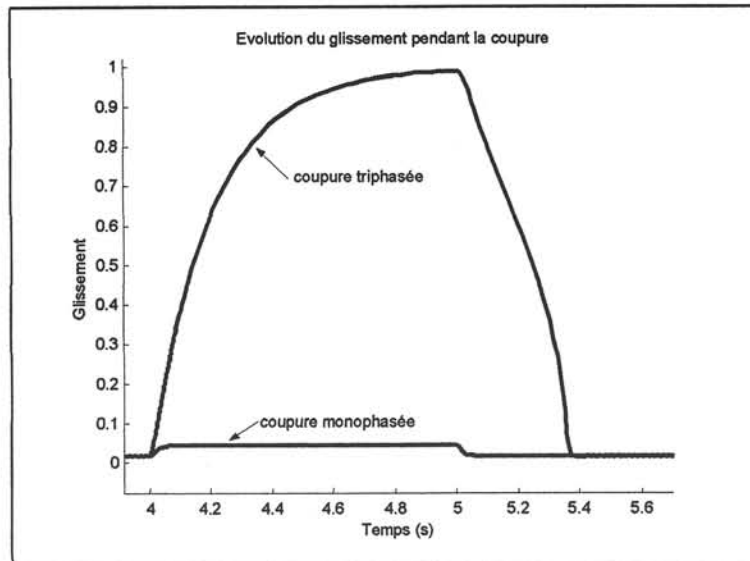


Figure 55: Évolution du glissement pendant une coupure de tension (triphasee et monophasée)

7 Synthèse

Les creux triphasés s'avèrent les plus contraignants pour les machines à induction, notamment du point de vue de la variation de vitesse. A l'opposé, les creux monophasés ne modifient que légèrement le comportement de la machine.

Creux de 40%	Glissement final	Couple final (pu)
Monophasé	0.2	0.98
Biphasé	0.35	0.97
Triphasé	0.8	0.93

Coupure : creux de 100%	Glissement maximum atteint pendant la coupure	Valeur minimale du couple atteinte pendant la coupure (pu)
Monophasé	0.045	0.803
Triphasé	1	0

Creux ou Coupures	Observations
Monophasé	affecte très peu les grandeurs des machines à induction
Biphasé	Décélération de la vitesse Variation du couple Appel de courant au rétablissement
Triphasé	Décélération de la vitesse Variation du couple Appel de courant au rétablissement

8 Conclusion

Dans ce chapitre, les différentes modélisations de la machine à induction développées dans le chapitre précédent ont été exploitées et comparées entre elles.

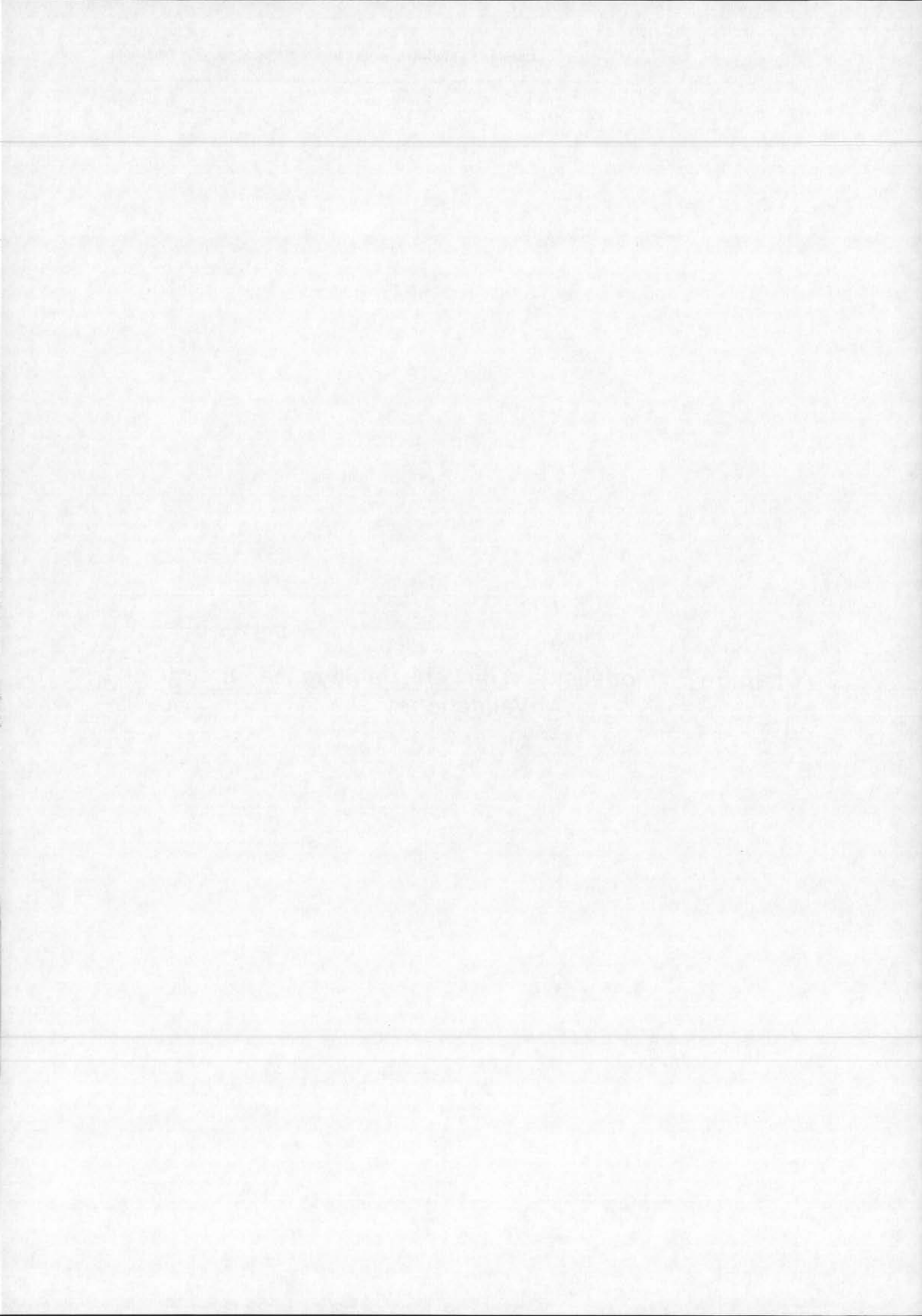
D'une part, la modélisation de l'effet de peau de la machine a été particulièrement détaillée. Cette modélisation s'est avérée indispensable non seulement pour la simulation du démarrage de la machine mais également pour le calcul de la valeur de la tension de décrochage à partir du modèle statique (§3), ainsi que pour l'étude des conséquences des creux de tension, notamment pendant le rétablissement de la tension (§4.3).

D'autre part, les différents modèles de machine à induction avec prise en compte de l'effet de peau (5^{ième}, 3^{ième}, 2nd et 1^{er} ordre) ont été comparés entre eux. Le modèle du cinquième ordre qui tient compte des transitoires électriques statorique et rotorique a été choisi comme modèle de référence pour la comparaison. Finalement, il est apparu que les modèles du 3^{ième} et 2nd ordres sont assez comparables puisqu'ils ne prennent en compte que le transitoire rotorique. Par contre, le modèle du 2nd ordre ne comprend qu'une seule équation électrique contre deux pour le modèle du troisième ordre en plus de l'équation mécanique. Bien sûr, cela entraîne que les oscillations notamment du glissement autour du régime permanent ne sont pas représentées aussi précisément par le modèle du second ordre que par celui du 3^{ème} ordre. Quant au modèle du premier ordre qui néglige tous les transitoires électriques, il présente des temps des réponses et une valeur de couple maximal assez différents des trois autres modèles.

Finalement, par souci de simplification, le modèle du second ordre sera utilisé pour la suite de l'étude. Par contre le modèle du premier ordre pourra toujours servir pour donner un ordre de grandeur de la valeur de la tension de décrochage.

Enfin, seuls les creux triphasés, qui sont les plus contraignants pour les machines à induction, seront considérés pour la suite de l'étude.

Chapitre 5 : Modélisation de l'ensemble réseau-charge et Validations



Chapitre 5 : Modélisation de l'ensemble réseau-charge et Validations

1	Introduction.....	134
2	Architecture générale du réseau:.....	134
2.1	Eléments du réseau.....	135
3	Principe de l'algorithme de simulation.....	137
3.1	Hypothèses.....	137
3.2	Algorithme du calcul de la propagation de la tension.....	137
4	Introduction au programme de simulation.....	140
4.1	Sémantique de l'indexation.....	140
4.2	Interface : Fichiers texte.....	141
4.3	Validation des résultats.....	142
5	Résultats de simulation.....	146
5.1	A l'apparition et au rétablissement de la tension.....	146
5.2	Etude du démarrage instantané de plusieurs moteurs.....	162
6	Conclusion.....	169



1 Introduction

Dans ce chapitre, sera développée la méthode de calcul utilisée pour simuler le comportement global de l'installation. Le calcul de la propagation du creux de tension sera basé sur un algorithme de répartition de puissance « load flow ». Seule la charge de type machine asynchrone est considérée. Son comportement vis à vis des creux de tension utilise le modèle du 2nd ordre développé dans le chapitre 3 (cf § III.5.3). En premier lieu, l'architecture générale du réseau sera donnée, les données nécessaires à fournir concernant les paramètres du réseau et des charges seront ensuite présentées

En second lieu, l'algorithme utilisé pour la programmation de la propagation des creux de tension sera décrit ainsi que les modèles de charges considérées lors des simulations.

Un réseau comportant 14 moteurs ensuite simulé à l'aide de l'algorithme développé dans le cadre de cette étude et les résultats seront comparés avec une simulation du même réseau sur SIMULINK.

2 Architecture générale du réseau:

Le réseau est de nature industriel, de type arborescent, avec un nœud source de puissance de court circuit infinie

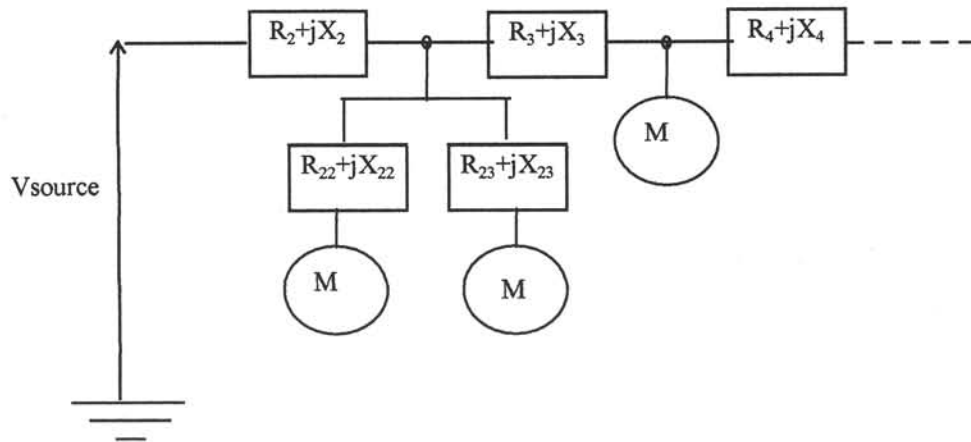


Figure 1: Schéma général du réseau

2.1 Eléments du réseau

Le réseau est modélisé par:

- Sa tension d'alimentation.
- Les impédances de lignes.
- Les charges connectées aux différents nœuds.

Les données nécessaires sont relatives à la tension du nœud source, aux lignes et enfin aux charges.

2.1.1 La tension d'alimentation

Il faut définir la valeur de la résistance et de la réactance des différentes portions de lignes

2.1.2 Les lignes

Il faut définir la valeur de la résistance et de la réactance des lignes

2.1.3 Les charges

La charge utilisée jusqu'à présent est la machine asynchrone entraînant une charge (ventilateur, pompe, etc...), pour définir ses paramètres il est possible de se référer aux données catalogue:

- Puissance mécanique nominale
- Facteur de puissance
- Tension nominale
- Courant nominal
- Vitesse de rotation nominale
- Rapport couple maximal sur couple nominal
- Inertie

Pour la charge entraînée il faut définir la caractéristique du couple résistant qui est de la forme $C_{\text{résistant}}(g) = ag^2 + bg + c$ (cf chapitre 4, §3.1.1).

L'inertie de la charge entraînée si elle n'est pas connue, peut être déduite à partir du temps de lancée correspondant. En effet, le temps de lancée dépend principalement du type de la charge entraînée quelque soit la puissance et la vitesse d'entraînement. L'inertie de la charge est calculée à partir de la formule suivante:

$$J = t_{\text{lancée}} \frac{P_n}{\Omega_n^2}$$

Le tableau suivant présente un exemple d'ordre de grandeur des temps de lancée selon le type de charge entraînée:

Type de charge	Forme du couple résistant	Temps de lancée
Ventilateur	$K\Omega^2$	5 à 10 s
Pompe	$K\Omega^2$	0.2 s
Broyeur	k	1s

Tableau 1: Exemple d'ordre de grandeur du temps de lancée

Pour la modélisation de l'effet de peau dans la machine asynchrone il faut définir le rapport du couple de démarrage et du couple C_c (voir définition dans la figure ci dessous) par rapport au couple nominal, ainsi que le glissement g_c correspondant à la valeur C_c de ce couple.

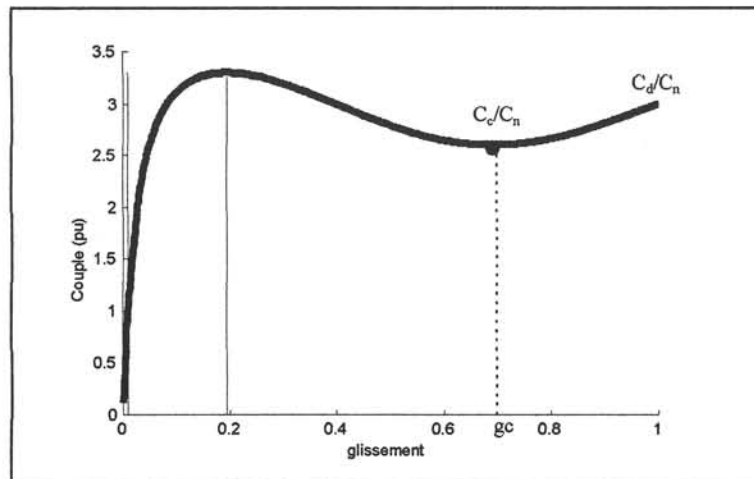


Figure 2: Caractéristique couple en fonction du glissement de la machine à induction

3 **Principe de l'algorithme de simulation**

3.1 **Hypothèses**

Afin de simplifier la méthode de résolution, les lignes seront considérées comme des impédances à constantes localisées. Ces hypothèses sont plausibles au vu des longueurs des lignes.

La dynamique de l'évolution des puissances se fait par un calcul de répartition de puissance à chaque pas de discrétisation:

- 1-Les nouvelles tensions obtenues au niveau de chaque nœud sont appliquées à la charge correspondante.
- 2-Les puissances consommées par la charge sont alors recalculées et modifiées pour la suite.
- 3-On calcule de nouveau pour un autre pas de calcul la nouvelle répartition des puissances dans le réseau.
- 4-Les nouvelles tensions obtenues au niveau de chaque nœud sont appliquées à la charge correspondante et on retourne à l'étape 2.

Notons que c'est le modèle dynamique du 2nd ordre des machines qui est mis à contribution.

3.2 **Algorithme du calcul de la propagation de la tension**

3.2.1 **Introduction des données**

Le réseau à simuler peut présenter une architecture arborescente, il est constitué.

- d'une source de tension (nœud source) modélisée par son amplitude et sa fréquence.
- de lignes modélisées par une résistance et une réactance.
- de charges qui seront des machines asynchrones. D'autres charges seront rajoutées à la bibliothèque de modèle au fur et à mesure de l'évolution du logiciel.

Les puissances active et réactive nominales de chaque charge servent à initialiser le calcul.

Certaines machines qui doivent démarrer ultérieurement sont désignées.

3.2.2 Calcul de la tension

- A partir des puissances nominales introduites, les tensions (ou le vecteur tension) sont calculées (les charges qui démarreront ultérieurement n'interviennent pas dans le calcul).
- Les pertes lignes sont estimées (à partir des tensions aux nœuds et impédances de ligne)
- Les puissances absorbées au niveau de chaque nœud sont modifiées.
- Le nouveau calcul du vecteur tension est fait.

3.2.3 Génération d'un creux de tension

Un creux de tension peut être dû soit à une chute de la tension d'alimentation, soit au démarrage des machines présentes dans le réseau.

3.2.3.1 Chute de tension au niveau du poste source

- Introduire de l'amplitude et de la durée du creux de tension au niveau de la source.
- Calculer le vecteur tension à partir des puissances nominales.
- Fixer un pas de calcul: T_{pc}
- Calculer les nouvelles puissances P et Q après T_{pc} secondes.
- Modifier le vecteur tension.
- Refaire les deux dernières instructions jusqu'à la fin du creux de tension.

3.2.3.2 Démarrage d'un moteur

- Définir un pas de calcul T_{pc} et le temps de simulation.
- Démarrer les moteurs progressivement selon leur temps de démarrage.
- Au bout d'un temps T_{pc} , extraire la valeur des puissances actives et réactives des machines.
- Recalculer le vecteur tension.
- Refaire les deux dernières étapes durant toute la durée de la simulation.

L'organigramme de l'algorithme de programmation est présenté ci-dessous :

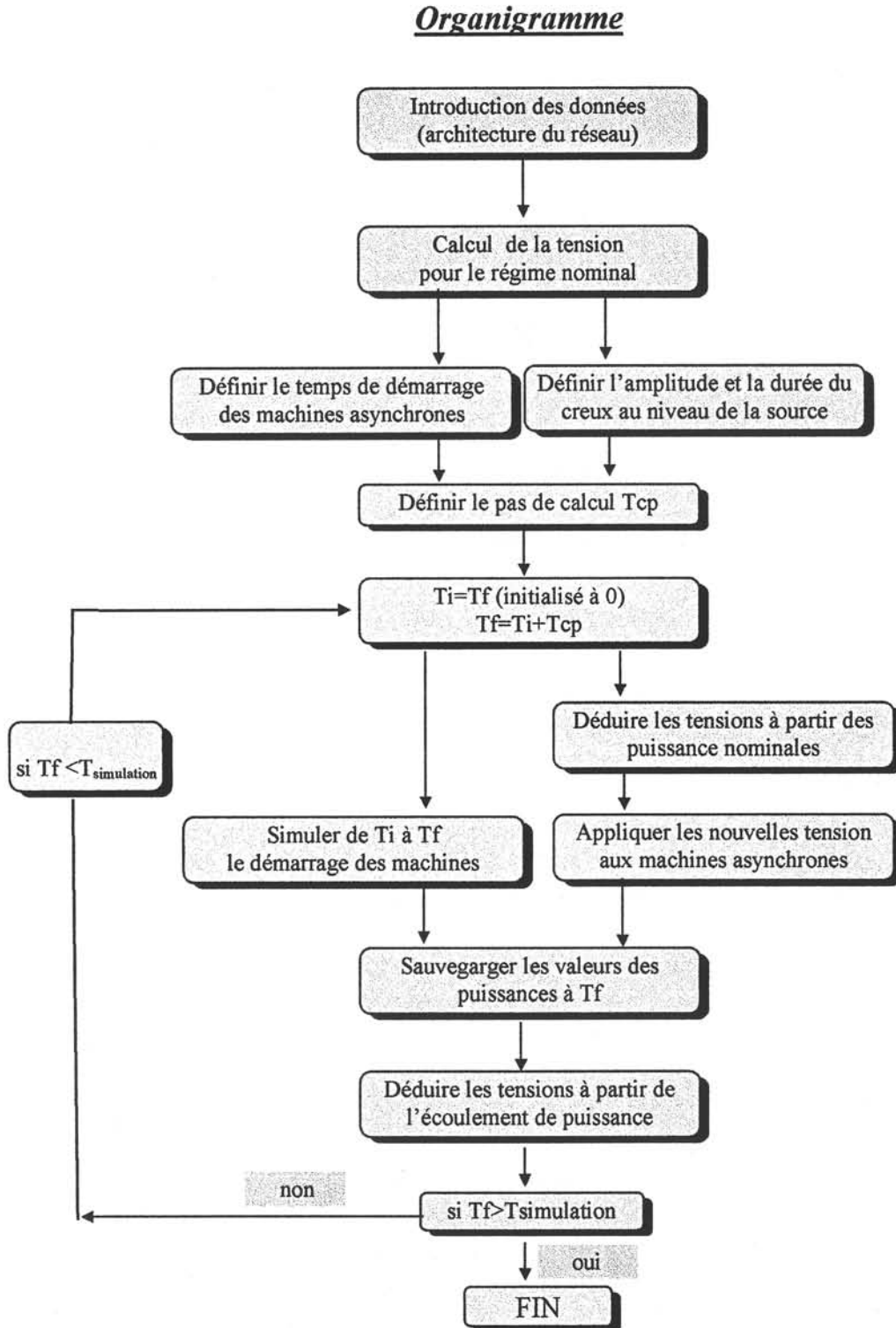


Figure 3: Organigramme général de l'algorithme

4 Introduction au programme de simulation

4.1 Sémantique de l'indexation

La sémantique de l'indexation peut s'illustrer par la figure ci-dessous :

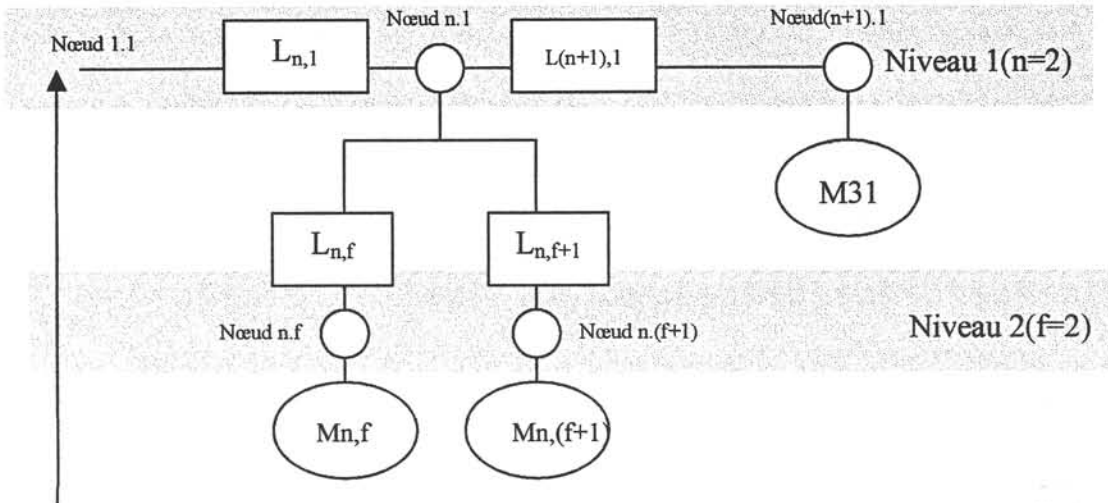


Figure 4: Sémantique de la numérotation des nœuds et charges

Les nœuds sont groupés en plusieurs niveaux comme le montre la Figure 4.

Le nœud source fait partie des nœuds de 1^{er} niveau. Si le réseau comporte un seul niveau le numéro du nœud source sera 1, si le réseau comporte deux niveaux il sera numéroté 1.1.

Plus généralement et ceci est valable pour tous les nœuds : si le réseau comporte n nœuds, tous les numéros du nœud comportent n chiffres, chaque chiffre indique le numéro du nœud dans le niveau correspondant.

Un nœud de niveau i est indexé par 1 relativement aux niveaux supérieurs (ainsi le nœud source est toujours de la forme 1.1.1...) et il a le même numéro que son père par rapport aux niveaux inférieurs. Pour un niveau " i ", la numérotation des nœuds de ce même niveau commence par 2 étant donné que le nœud père de niveau " $i-1$ " a été indexé par 1 relativement à ce niveau.

Dans l'exemple de la Figure 4, si le réseau comportait 3 niveaux au lieu de 2, il aurait fallu ajouter un indice (1) à tous les nœuds de niveau 1 et 2. Par exemple Le nœud $(n,1)$ du premier niveau deviendrait $(n,1,1)$.

De même, de manière plus générale, si le réseau comportait x niveaux, il aurait fallu ajouter à tous les nœuds de niveau (1) jusqu'à $(x-1)$, un indice (1). Par exemple, le nœud $(n,1)$ du premier niveau devient $(n,1,..1)$ (le nombre de (1) présent est x -niveau du nœud $(x-1)$ dans ce cas).

Le nœud (n,f) devient $(n,f,1..1)$ (le nombre de 1 présent est x -niveau du nœud $(x-2)$ dans ce cas)

Cette sémantique est illustrée par le réseau suivant :

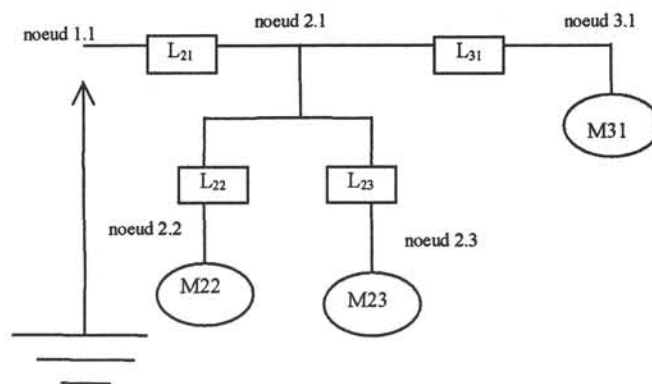


Figure 5: Exemple de réseau

Ce réseau présente deux niveaux d'arborescence, au premier niveau on trouve les nœuds (2.1) et (3.1) au second niveau les nœuds (2.2) et (2.3).

4.2 Interface : Fichiers texte

L'interface entre l'utilisateur et le logiciel est basée sur 4 fichiers texte

1. Fichier texte pour définir les données du réseau
2. Fichier texte pour définir éventuellement les instants de démarrages successifs des machines asynchrone
3. Fichier texte pour définir éventuellement les caractéristiques du creux de tension originaire du poste source
4. Fichier texte pour définir les paramètres de simulation

4.3 Validation des résultats

Soit le réseau suivant à étudier (*Document de travail EDF*)

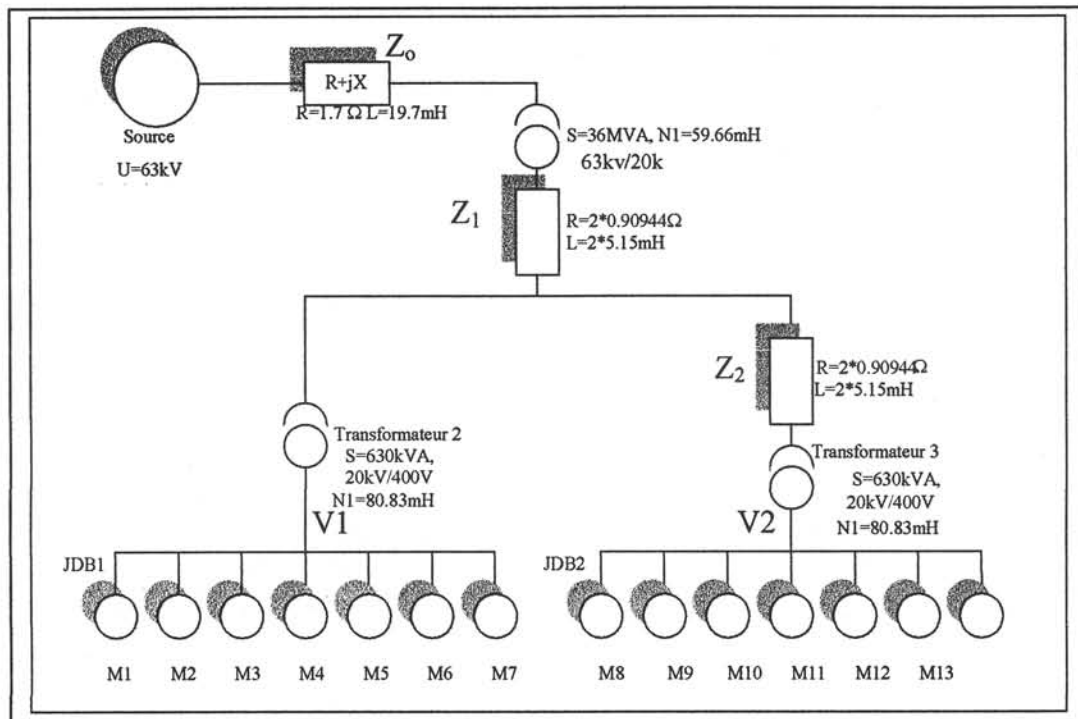


Figure 6 Schéma de l'installation à étudier

Ce réseau comprend 14 moteurs, 3 transformateurs : Un transformateur HTB/HTA et deux transformateurs HTA/BT.

Le fichier texte correspondant à ce réseau est présenté et commenté dans l'Annexe 6.

Les caractéristiques des machines et des charges entraînées sont résumées dans le tableau suivant :

Données catalogue de la machine à induction									Paramètres de la machine				Charge entraînée				
Numéro Machine	Puissance Mécanique (kW)	Vitesse nominale (rad/s)	Courant nominal (A)	Moment d'inertie	Facteur de puissance	Couple minimal			Glissement minimal/C _n	Résistance Statorique (Ohm)	Résistance Rotorique (Ohm)	Inductance de fuite (mH)	Inductance Magnétisante mH	Ordre	Couple Statique (m.N)	Couple de Charge/C _n	Temps de lancée (s)
						Cd/Cn	Cmax/Cn	Cmin/Cn									
1	7.5	1450	15.2	0.033	0.84	2.7	3.1	124.1	0.65	1.57	0.57	2.52	79.6	2	0	75%	5
2	18.5	1455	35.1	0.089	0.85	2.8	2.9	306.2	0.69	0.22	0.23	3.85	49	2	0	75%	0.2
3	37	1475	67	0.23	0.86	2.4	2.6	518.2	0.68	0.085	0.65	2.31	29.2	2	0	75%	5
4	75	1480	135	1.28	0.85	2.6	2.7	1146	0.69	0.032	0.026	1.13	13.8	2	0	75%	0.2
5	90	1480	162	1.45	0.85	2.9	2.9	1604.2	0.65	0.026	0.022	0.87	11.22	2	0	75%	0.2
6	110	1490	193	2.74	0.86	2.9	2.9	1890.7	0.65	0.019	0.0091	0.72	9.98	2	0	75%	0.2
7	160	1485	276	3.37	0.87	3	3.3	2852	0.7	0.01	0.0094	0.44	7.06	2	0	75%	0.2
8	7.5	1450	15.2	0.033	0.84	2.7	3.1	124.1	0.65	1.57	0.57	2.52	79.6	2	0	75%	5
9	18.5	1455	35.1	0.089	0.85	2.8	2.9	306.2	0.69	0.22	0.23	3.85	49	2	0	75%	0.2
10	37	1475	67	0.23	0.86	2.4	2.6	518.2	0.68	0.085	0.65	2.31	29.2	2	0	75%	5
11	75	1480	135	1.28	0.85	2.6	2.7	1146	0.69	0.032	0.026	1.13	13.8	2	0	75%	0.2
12	90	1480	162	1.45	0.85	2.9	2.9	1604.2	0.65	0.026	0.022	0.87	11.22	2	0	75%	0.2
13	110	1490	193	2.74	0.86	2.9	2.9	1890.7	0.65	0.019	0.0091	0.72	9.98	2	0	75%	0.2
14	160	1485	276	3.37	0.87	3	3.3	2852	0.7	0.01	0.0094	0.44	7.06	2	0	75%	0.2

Tableau 2: Caractéristiques des machines présentes dans le réseau

Ce réseau sera étudié pour trois scénarii:

- Une défaillance de la tension d'alimentation.
- Un rétablissement de la tension d'alimentation.
- Des démarrages simultanés des machines .

4.3.1 Instants de démarrage

Le Tableau 3 donne les instants de démarrages des différents moteurs. Le Tableau 4 donne les caractéristiques du creux de tension généré au niveau du poste source.

Machine	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Instants de démarrage (s)	1	1	2	3	4	5	6	8	8	9	10	11	12	13

Tableau 3: Temps de démarrage des machines

Profondeur	Temps de montée	Temps de descente	Durée
30%	1ms	1ms	300ms

Tableau 4: Caractéristiques du creux de tension

Les résultats de simulation issus de l'algorithme présenté sont comparés avec des simulations fines issues de lignes et de modèles de moteurs du second ordre implantés dans le logiciel Simulink de Matlab. Il a fallu pour cela implanter ce réseau sous Matlab/Simulink.

Les éléments nécessaires à la modélisation du réseau sous Matlab Simulink sont les suivants:

Eléments disponibles dans la bibliothèque:

- Tension source: présente dans la bibliothèque de Matlab
- Impédances de ligne: à partir des modèles de la bibliothèque de Matlab (R,L)

Eléments développés dans et pour Simulink

- **Transformateurs:**

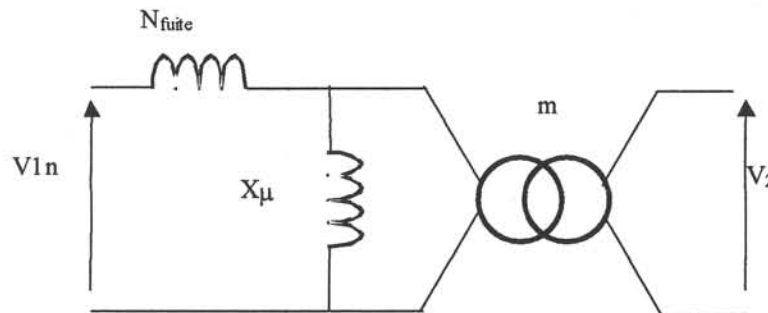


Figure 7 : Schéma équivalent monophasé ramené au primaire

Les données nécessaires pour définir les caractéristique du transformateurs sont:

- La tension de court circuit du transformateur: u_{cc} (en %)
- La puissance apparente nominale : S_n
- La tension d'alimentation nominale : V_{1n}
- Et le rapport de transformation : m

L'inductance de fuite N_{fuite} est calculée à partir de l'équation suivante:

$$N_{fuite} = \frac{3V_{1n}^2}{\omega_s S_n} u_{cc} (H)$$

- ***Machines à induction.***

Le modèle de machine à induction présent dans Matlab est un modèle du cinquième ordre dans le référentiel de Concordia, qui ne prend pas en compte l'effet de peau de la machine à induction.

Nous avons donc dû enrichir la bibliothèque de Matlab de notre modèle du second ordre avec prise en compte de l'effet de peau. Ce dernier permet également de simuler avec moins d'occupation mémoire qu'un modèle d'ordre supérieur.

L'interface entre SIMULINK et le PSB(Power System Blockset) a été faite) à partir des éléments de mesures disponibles dans la librairie (PSB vers SIMULINK : voltmètres et ampèremètres et de SIMULINK vers PSB : générateurs de tension et de courant commandés).

5 Résultats de simulation

Le paragraphe suivant présente une étude comparative entre les résultats obtenus à partir de MATLAB/SIMULINK et l'algorithme développé. Pour des raisons de compréhension, nous ferons le raccourci de désigner par algorithme notre programme et par modèle Matlab le réseau implanté dans Matlab/Simulink.

Les résultats suivants sont établis pour deux cas principaux :

- à l'apparition d'un creux de tension et au rétablissement de la tension.
- pendant le démarrage simultané de plusieurs moteurs.

Les résultats obtenus à partir de l'algorithme ont été simulés avec un pas de calcul de 10 ms. Pour le modèle Matlab une méthode numérique à pas variable a été choisie.

5.1 A l'apparition et au rétablissement de la tension

5.1.1 Evolution de l'amplitude de la tension aux bornes des deux groupes de machines

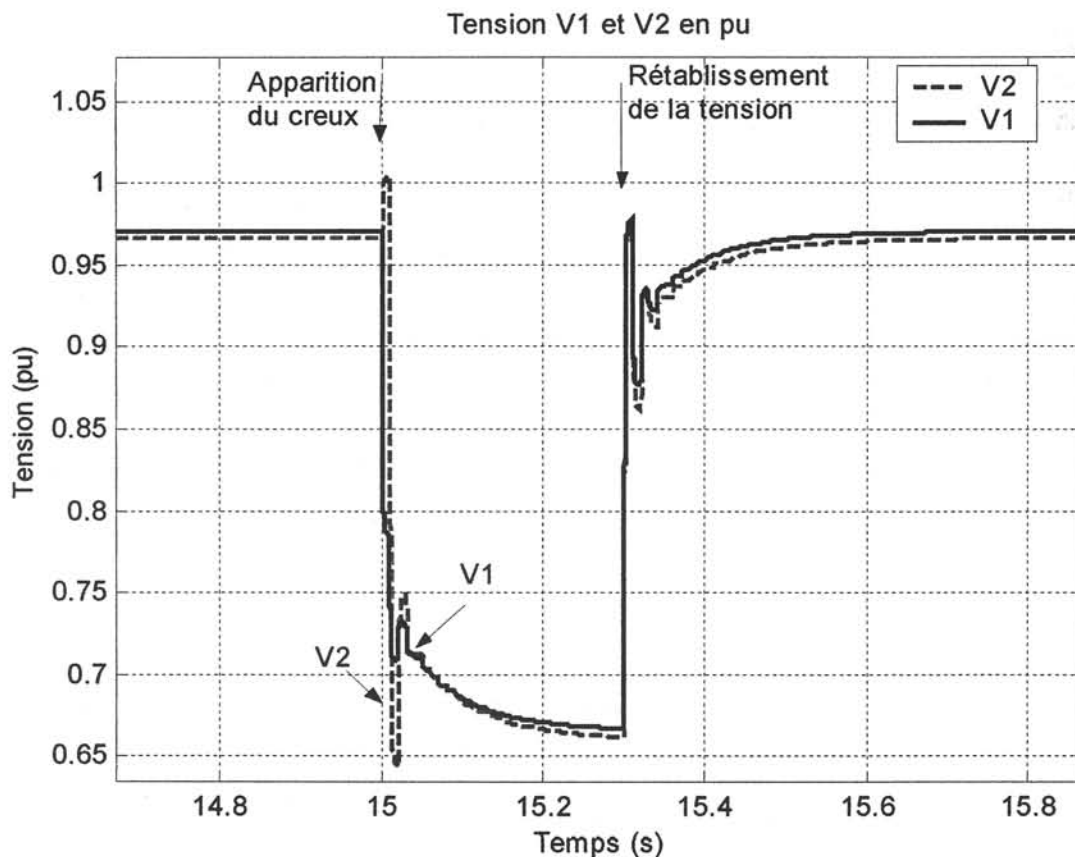


Figure 8: tension au nœud source et aux bornes des deux groupes de machines

La Figure 8 présente l'amplitude de la tension calculée à partir de l'algorithme. Les tensions V_1 et V_2 correspondent respectivement à la tension aux bornes des deux groupes de machines en parallèle de la Figure 6, M1 à M7 d'une part et M8 à M14 d'autre part.

La tension V_2 est légèrement inférieure à la tension V_1 . Ceci s'explique en termes de puissance de court circuit P_{cc} , en effet la P_{cc} calculée au nœud correspondant à V_2 est inférieure à la P_{cc} au nœud correspondant à V_1 :

En ramenant les impédances du réseau au primaire du transformateur HTB/HTA on trouve

$$P_{cc}(V1) = \frac{V_n^2}{Z_0 + Z_1 + N\omega} \text{transfo1} + N\omega \text{transfo2} = 143 \text{MVA}$$

et

$$P_{cc}(V2) = \frac{V_n^2}{Z_0 + Z_1 + Z_2 + N\omega} \text{transfo1} + N\omega \text{transfo3} = 137 \text{MVA}$$

5.1.2 Comparaison de l'amplitude de la tension issu de l'algorithme par rapport à l'allure temporelle déduite de la simulation sur Matlab/Simulink

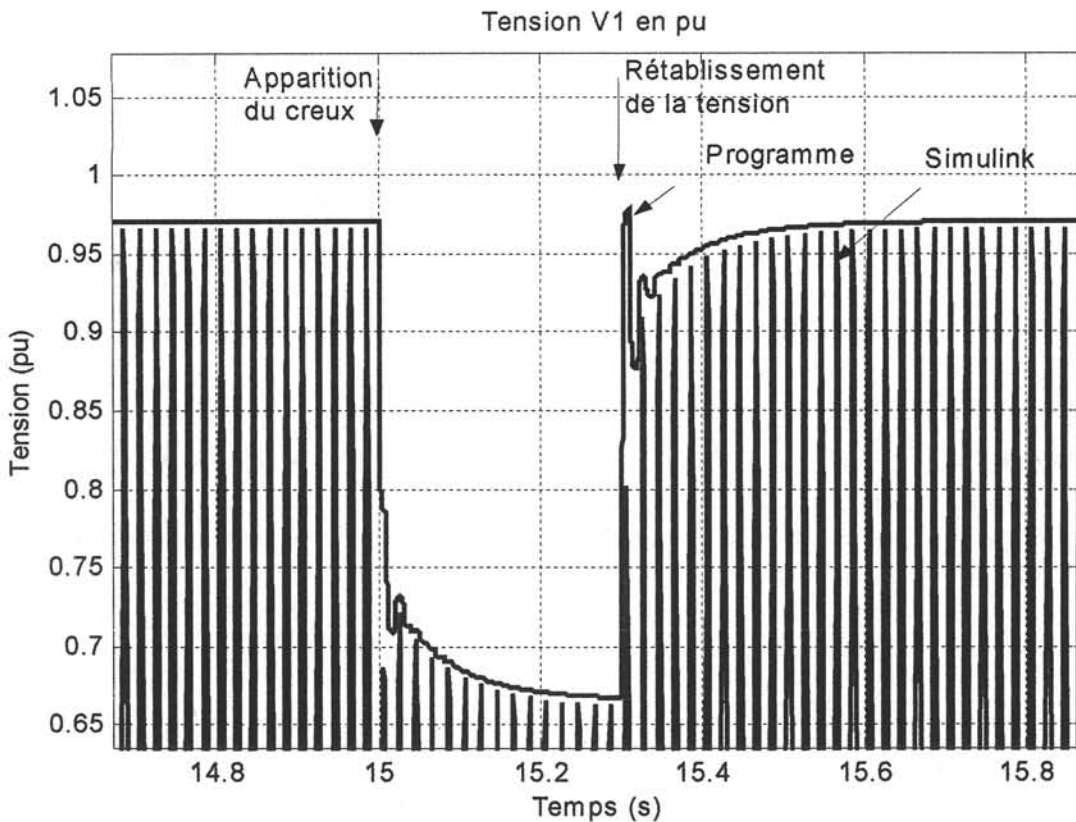


Figure 9 : Tension V1 : Amplitude issue de l'algorithme de calcul et allure temporelle issue du modèle Matlab

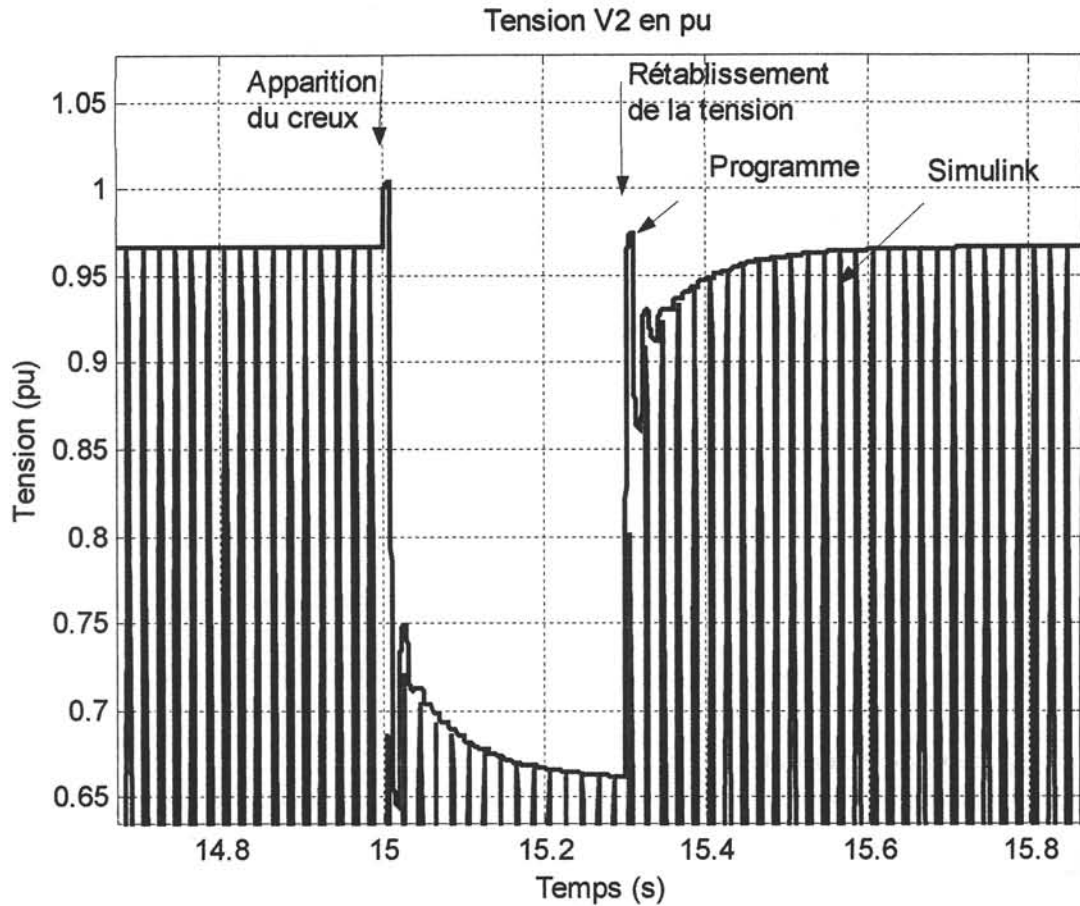


Figure 10 : Tension V2 : Amplitude issue de l'algorithme de calcul et allure temporelle issue du modèle Matlab

La Figure 9 et la Figure 10, présentent une comparaison, pour les deux tensions V1 et V2.. L'allure temporelle est issue du modèle Matlab et l'amplitude est calculée à partir de l'algorithme

On remarque que l'évolution de l'amplitude traduit bien la dynamique observée à l'apparition du creux de tension ainsi qu'au rétablissement.

D'autre part le creux source étant de 30% de profondeur, il a été accentué au niveau des nœuds V₁ et V₂ pour atteindre 33%, et dans ce cas également les résultats entre les deux simulations sont concordants.

Si les résultats des deux simulations sont concordants, Nous avons remarqué un gain de temps d'à peu près un facteur 20 à l'avantage de notre algorithme.

5.1.3 Evolution de la vitesse

La vitesse est l'un des paramètres importants à examiner pendant l'apparition d'un creux de tension. Pour la suite, les résultats relatifs aux machines 2 et 7 seront représentés, ces deux machines appartiennent chacune à une gamme assez différente l'une de l'autre du point de vue inertie et puissance.

M	2	7
Vitesse avant creux (prog)	1465.2	1488.45
Vitesse avant creux (simulink)	1464.9	1488.36
Ecart en % avant le creux	0.02	0
Vitesse creux (prog)	1416.5	1471.3
Vitesse creux (simulink)	1415.8	1471.2
Ecart en % pendant le creux	0.05	0

Tableau 5: Vitesse des machines M7 et M2 avant et pendant le creux

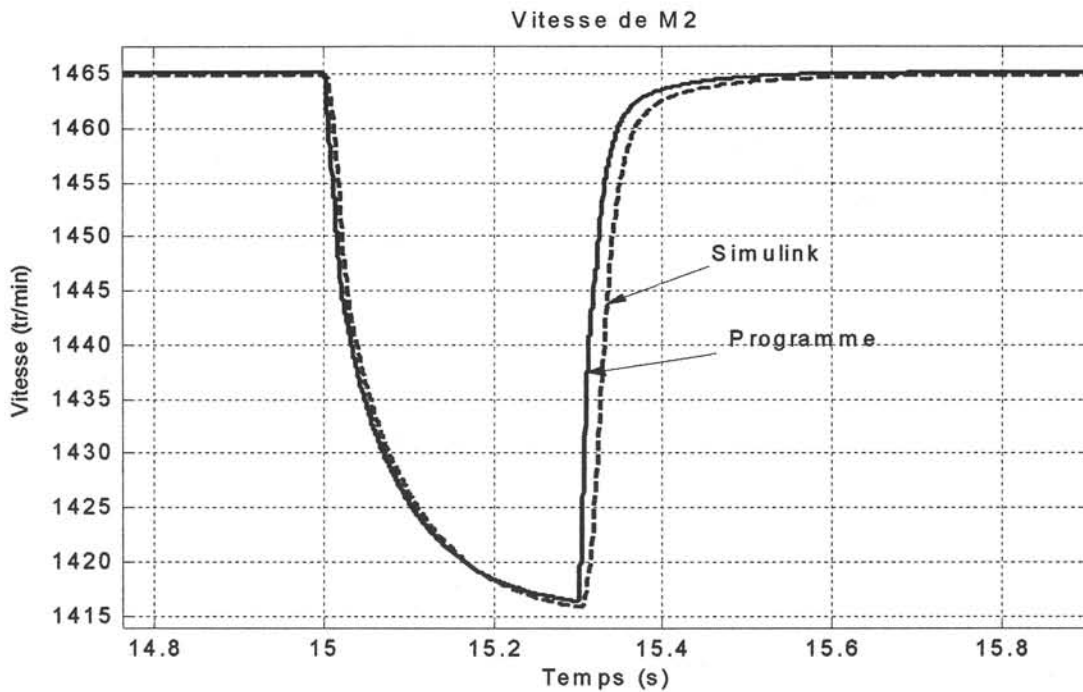


Figure 11: Vitesse de M2 pendant le creux

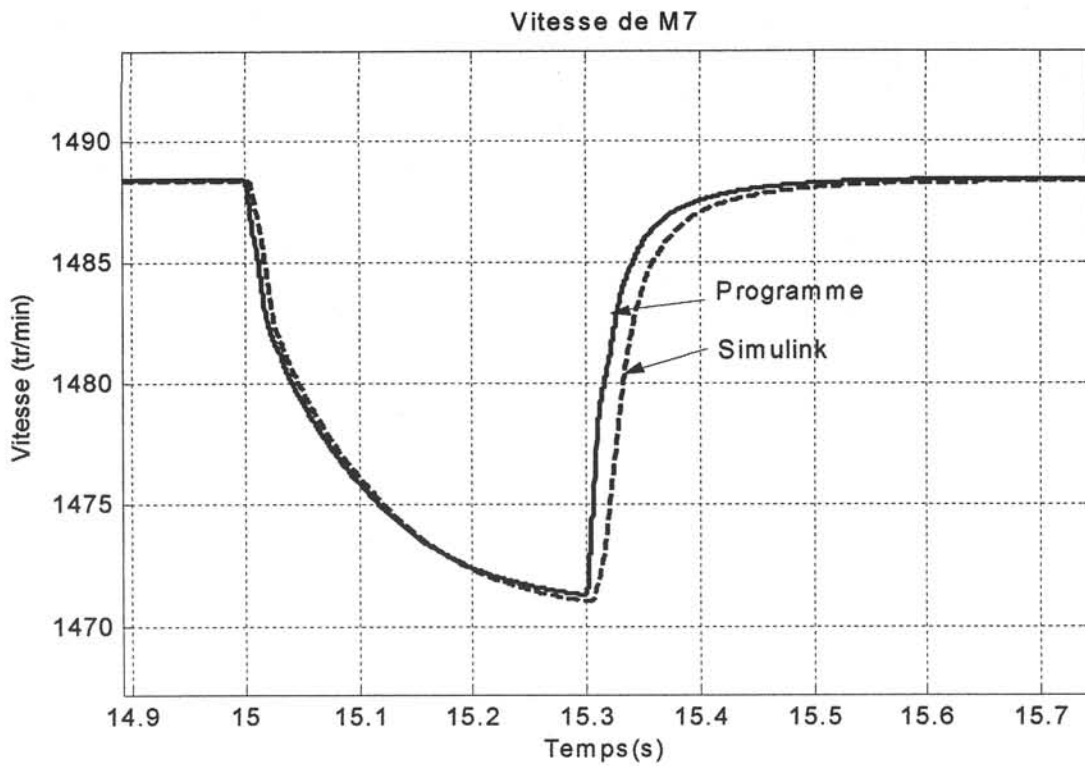


Figure 12: Vitesse de M7 pendant le creux

La vitesse est une grandeur mécanique de la machine. Elle présente moins d'oscillation que la tension à l'apparition du creux et au rétablissement de la tension. Les résultats (modèle Matlab et algorithme) présentent une allure de la vitesse très proche, dans les deux cas l'écart sur la valeur de la vitesse est négligeable durant le creux ainsi qu'en régime permanent.

La valeur de l'écart relativement plus importante durant le creux et au rétablissement de la tension s'explique par la dynamique des lignes que néglige notre algorithme; nous rappelons à cet effet que dans ce cas les lignes sont considérées comme des impédances.

5.1.4 Comparaison de l'évolution du courant absorbé par les machines

5.1.4.1 Pendant un creux de tension et au rétablissement

La Figure 13 et la Figure 14, présentent l'allure du courant absorbée respectivement par les machines M2 et M7, pendant un creux de tension de profondeur 30% de durée 300ms et au rétablissement de la tension.

Dans ces figures, sont présentées l'amplitude du courant déduite de l'algorithme développé pour l'outil de simulation, et l'allure temporelle issue du modèle du réseau sur Matlab.

On voit que l'amplitude suit bien la dynamique obtenue avec l'allure temporelle. On remarque cependant une plus grande différence pendant le régime transitoire notamment au rétablissement, ce qui s'explique par la dynamique des lignes que néglige notre algorithme.

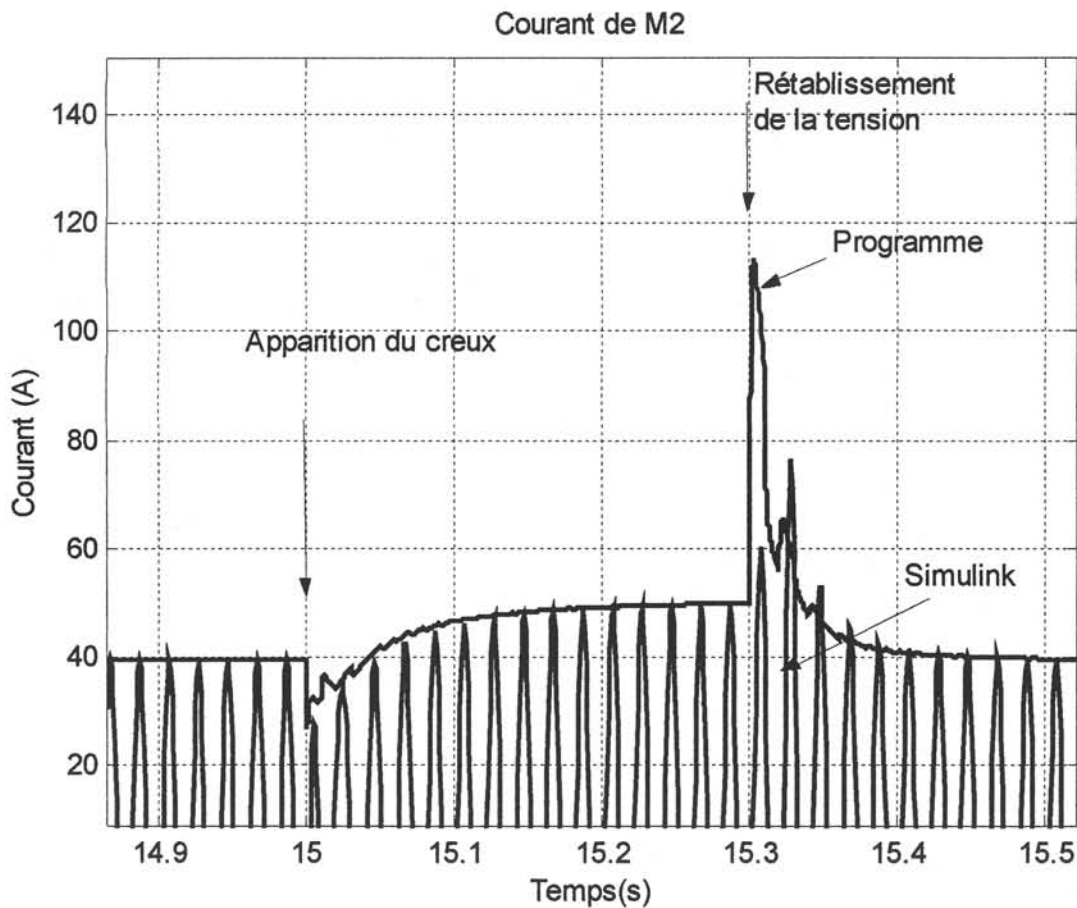


Figure 13 : : Amplitude du courant de M2 issu du programme et allure temporelle du résultat sur Matlab/simulink

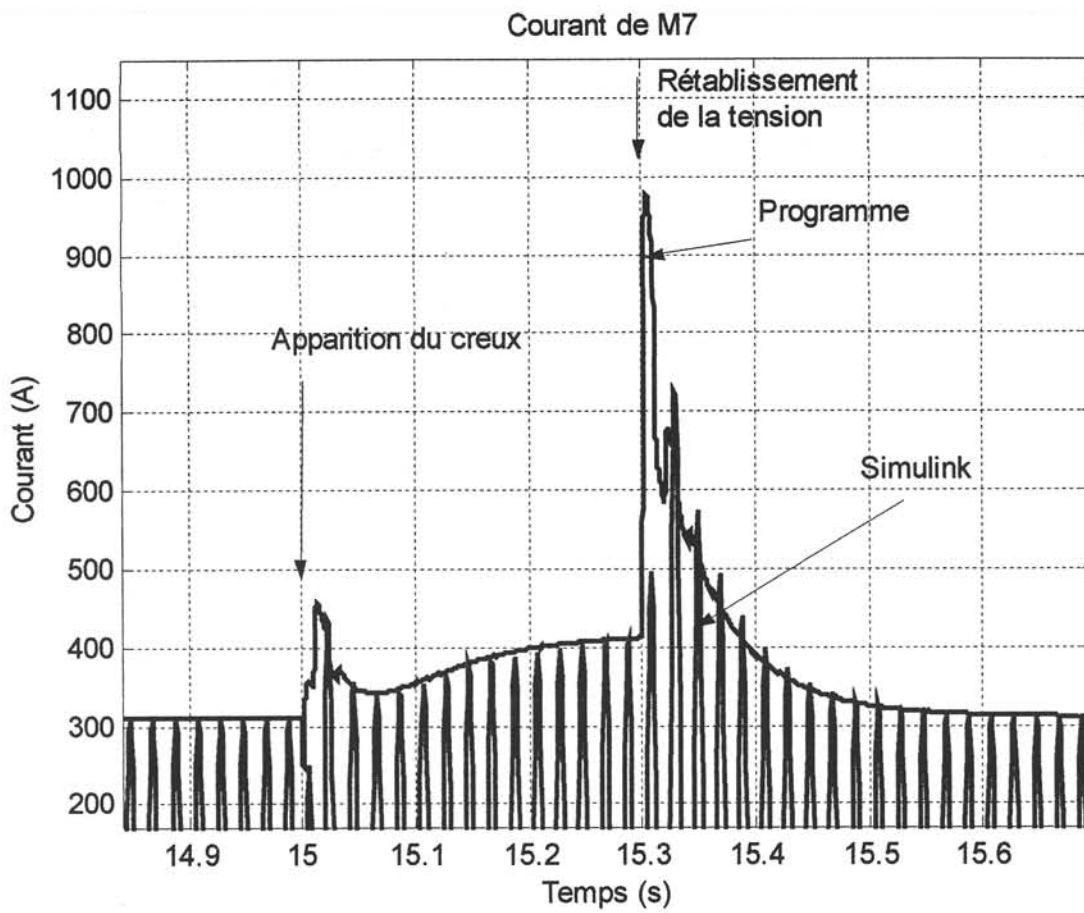


Figure 14 : Amplitude du courant de M7 issu du programme et allure temporelle du résultat sur Matlab/simulink

5.1.5 Au démarrage

La Figure 15 et la Figure 16 présentent respectivement les allures du courant au démarrage de M2 et M7.

Dans ces figures, sont présentées l'amplitude du courant déduite de l'algorithme, et l'allure temporelle issue du modèle Matlab.

On voit que l'amplitude suit bien la dynamique obtenue avec l'allure temporelle, de même le temps d'établissement du courant est du même ordre dans les deux cas.

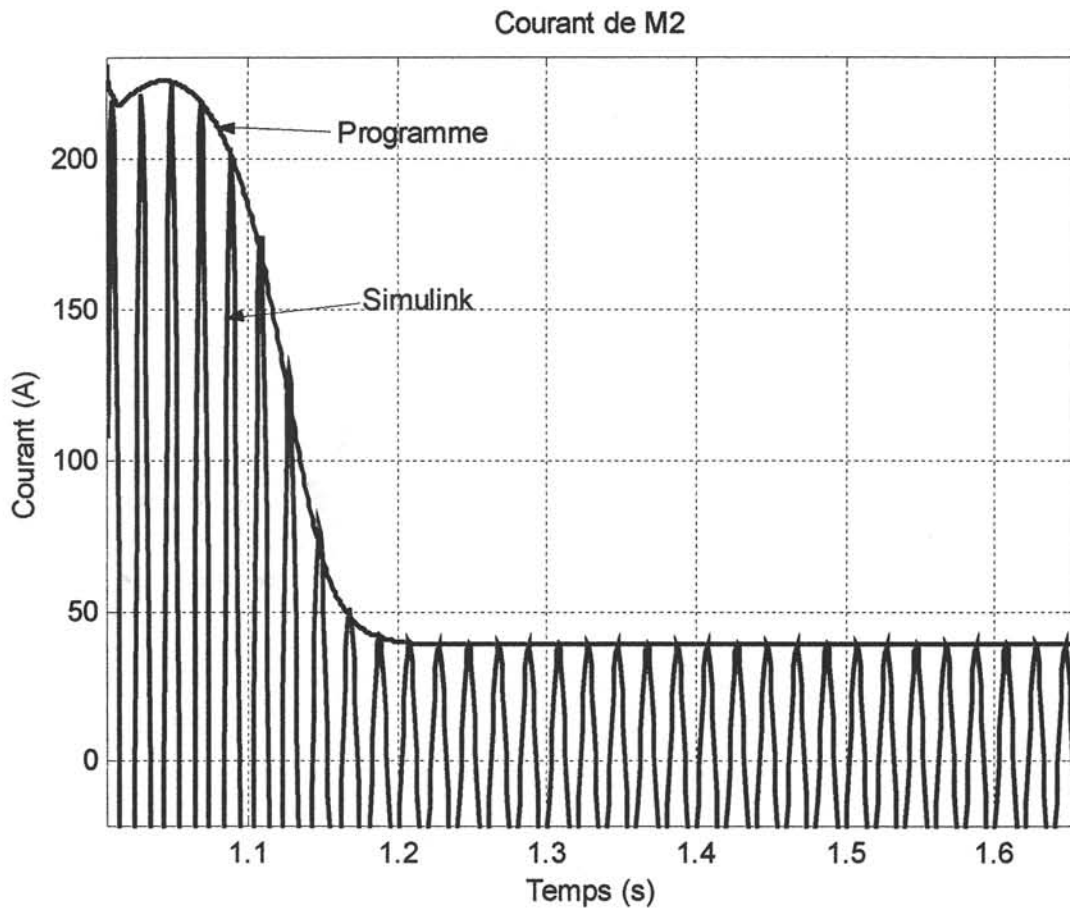


Figure 15: Courant de M2 au démarrage

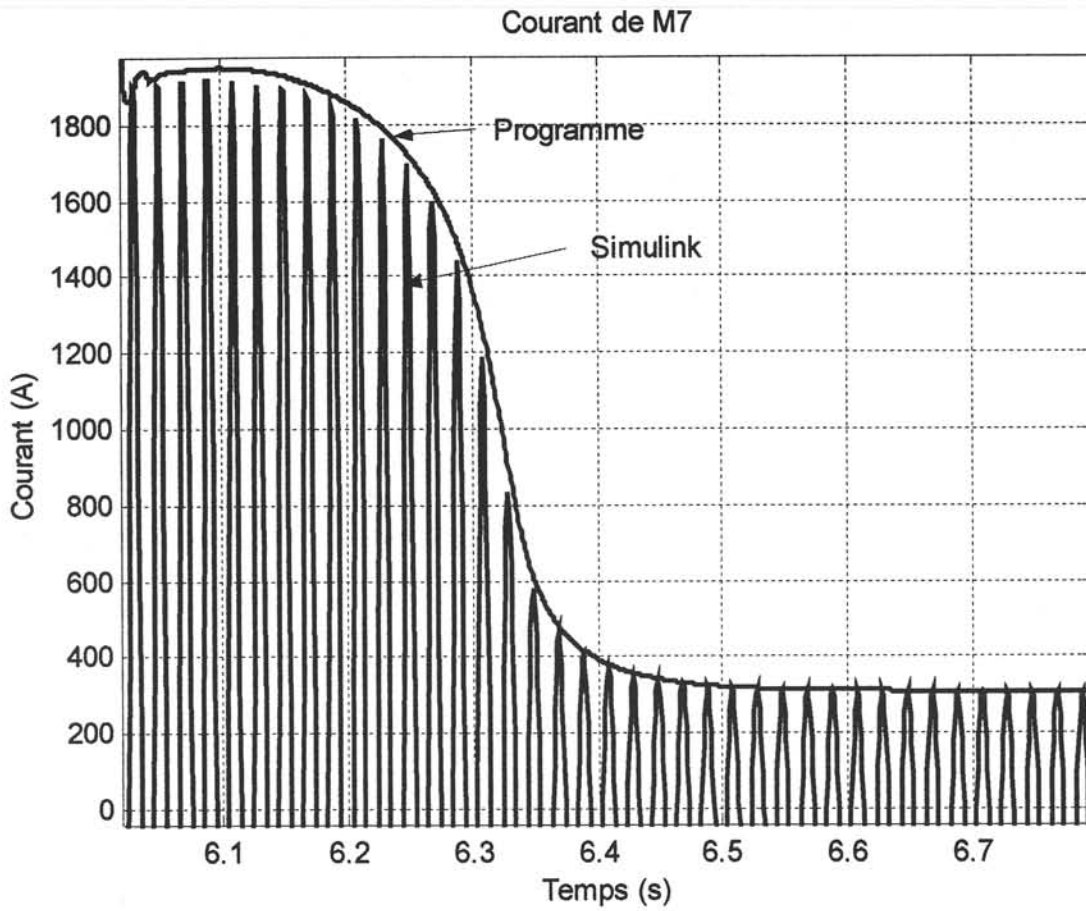


Figure 16: Courant de M7 au démarrage

5.1.6 Comparaison des allures temporelles (M7)

Les figures suivantes montrent qu'il est possible de reconstituer l'allure temporelle des courants à partir du modèle de Park.

La Figure 17 et la Figure 18 présentent une étude comparative entre les deux allures temporelles (programme et Matlab) au démarrage et suite à l'apparition et la disparition d'un creux de tension respectivement.

5.1.6.1 Au démarrage

L'algorithme ne fournit pas seulement les amplitudes des courants mais également leurs phases, nous montrerons ici que l'allure temporelle des courants reconstitués à partir de l'algorithme sont similaires aux allures du modèle Matlab.

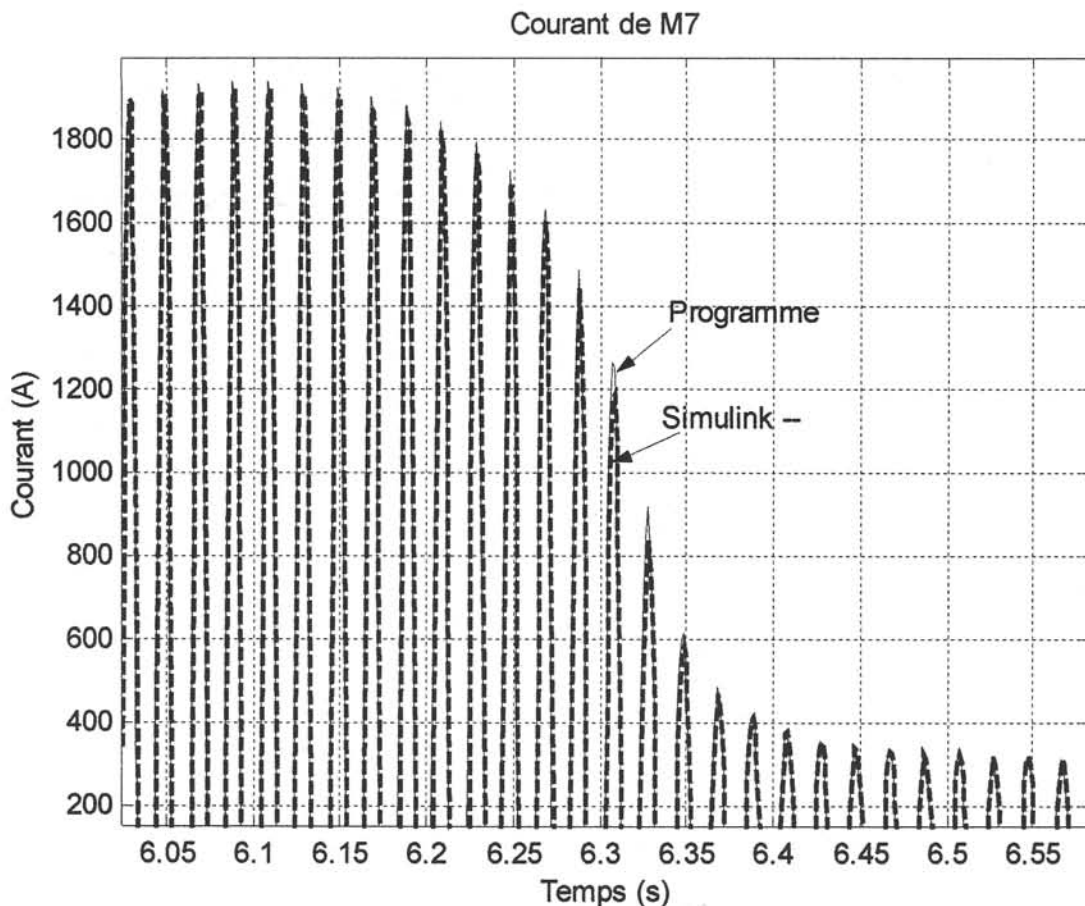


Figure 17 : Allure temporelle du courant de M7 au démarrage

5.1.7 pendant le creux

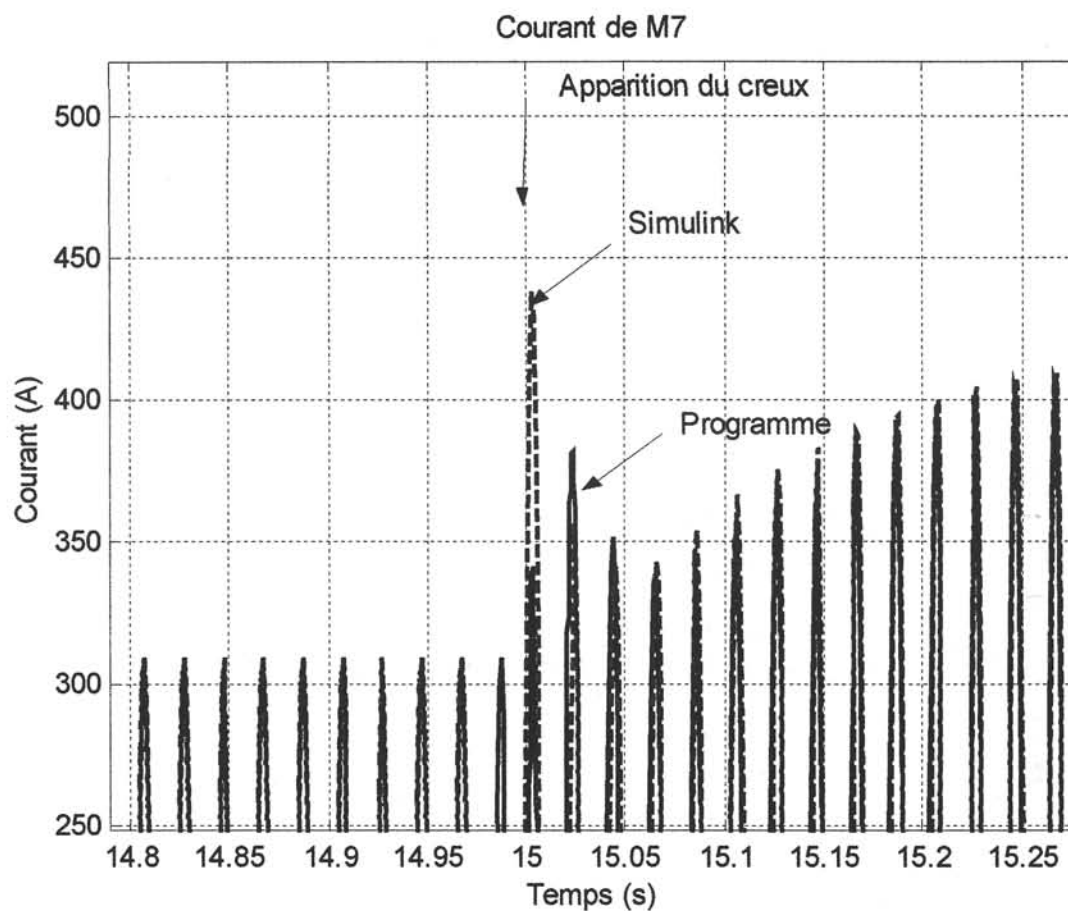


Figure 18 : Allure temporelle du courant de M7 pendant le creux de tension

5.1.8 Au rétablissement

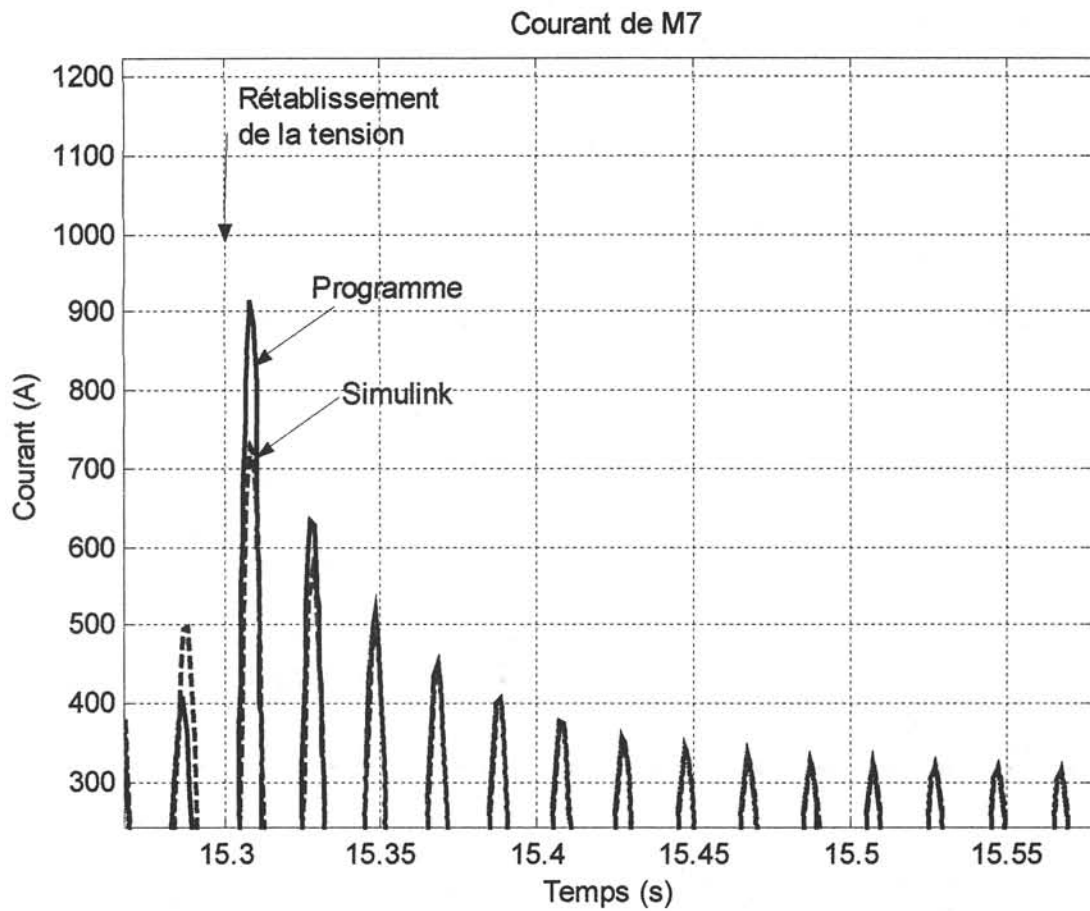


Figure 19 : Allure temporelle du courant de M7 au rétablissement

Nous avons donc montré la concordance allures temporelles issues de l'algorithme et du modèle Matlab. Ceci dit et à des fins de présentation nous ne montrerons par la suite que les valeurs de crêtes.

5.1.9 Couple en fonction du temps

Dans ce paragraphe sont représentées les allures du couple électromagnétique en fonction du temps des machines M2 et M7 pendant la phase de démarrage et suite à l'apparition et la disparition d'un creux de tension.

5.1.9.1 Pendant le creux et le rétablissement de la tension

La Figure 20 et la Figure 21, présentent l'allure du couple électromagnétique en fonction du temps pendant le creux de tension et au rétablissement.

La plus grande différence entre les deux méthodes de calcul est observée pendant le rétablissement.

La différence observée est due encore une fois à l'hypothèse de lignes impédantes (sans dynamique).

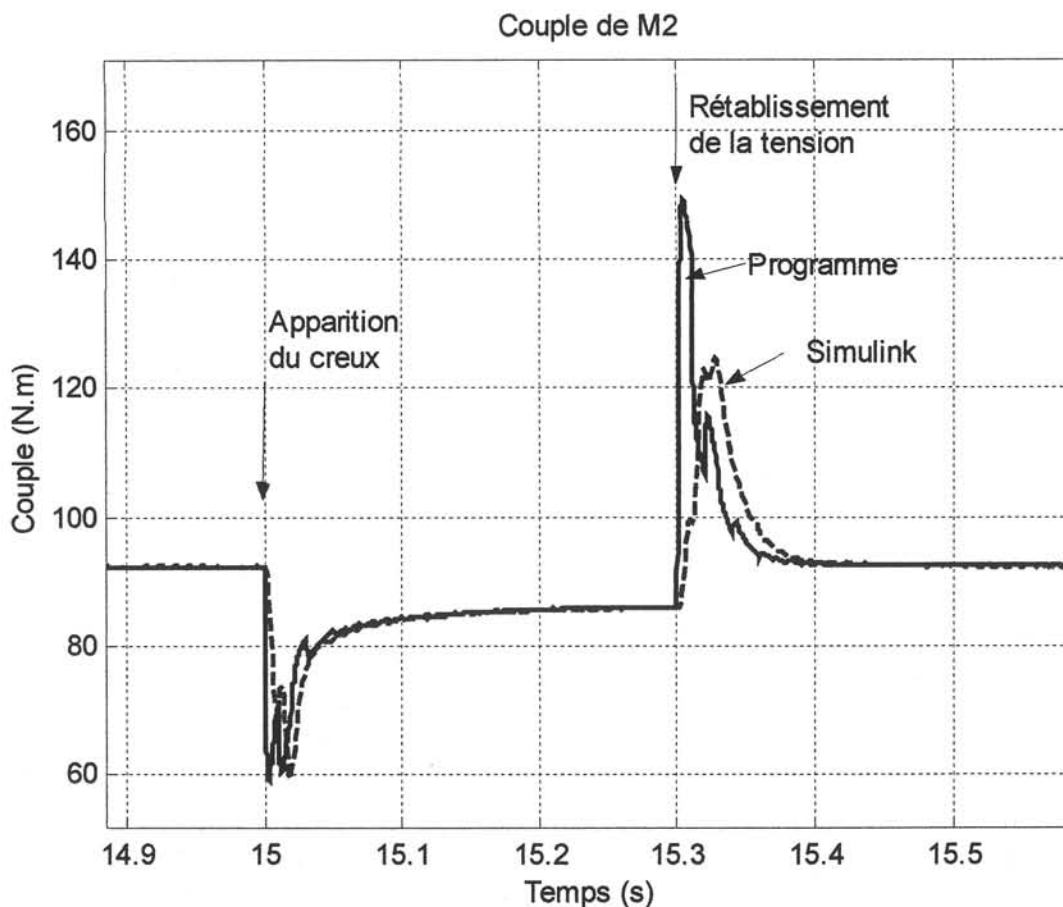


Figure 20 : Couple électromagnétique de M2 pendant le creux de tension et au rétablissement

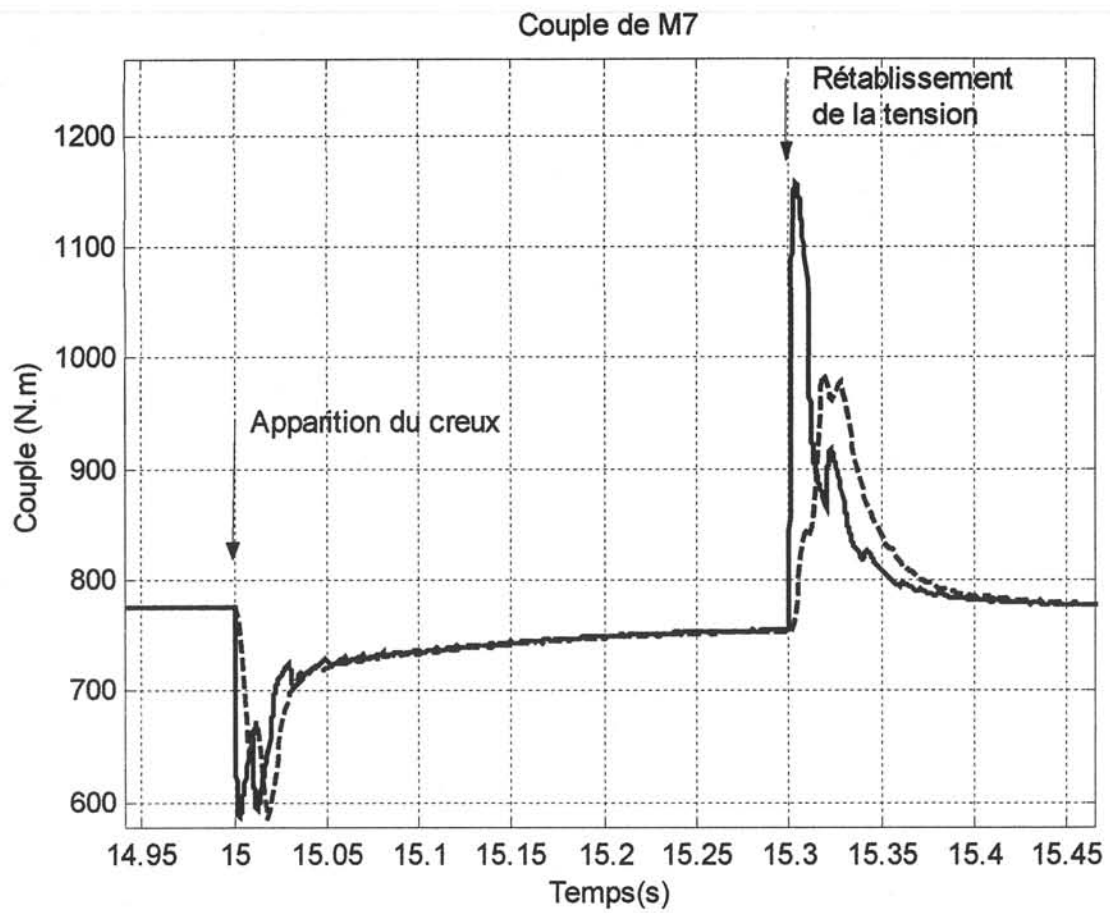


Figure 21: Couple électromagnétique de M7 pendant le creux de tension et au rétablissement

5.1.9.2 Au démarrage

La Figure 22 et la Figure 23 présentent l'allure du couple électromagnétique des machines M2 et M7 respectivement, pendant la phase de démarrage en fonction du temps.

Une chute dans la valeur du couple est observée au début du démarrage, cette chute serait la conséquence d'une variation de la tension au nœud qui alimente la machine en question, suite au démarrage de la machine elle même.

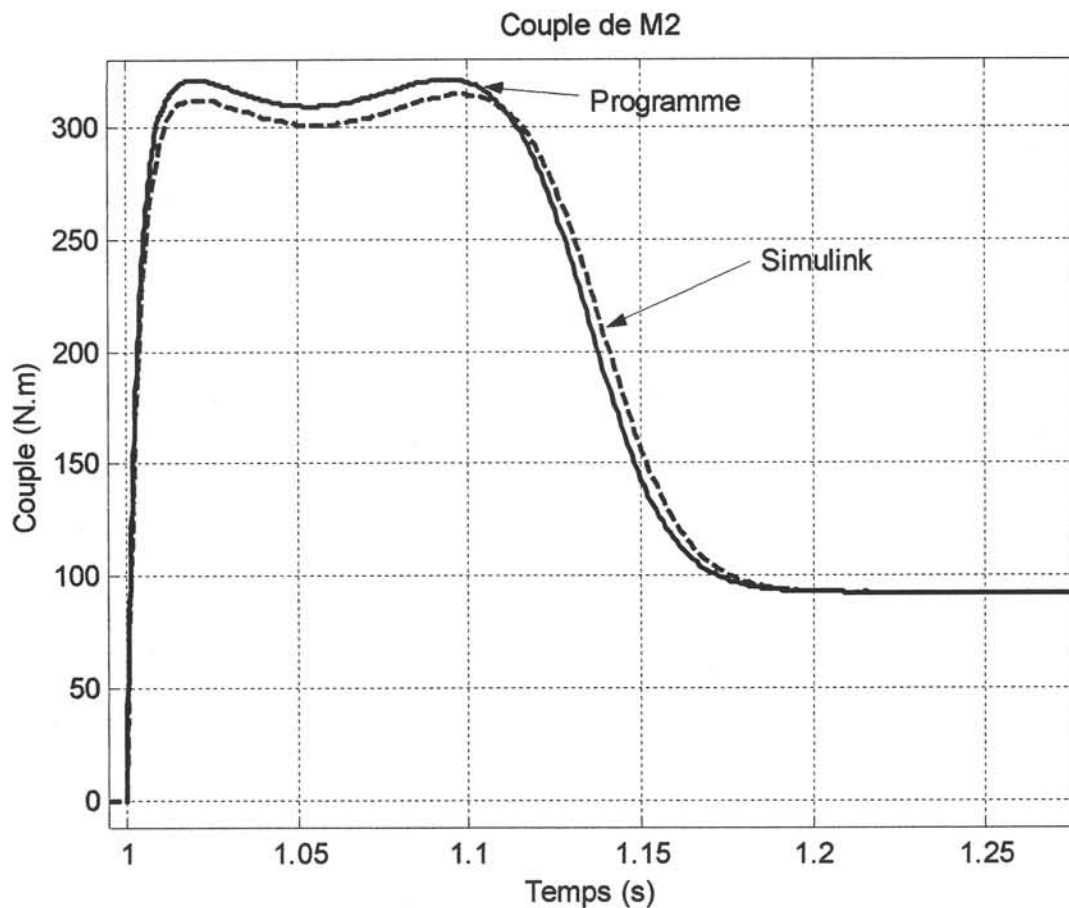


Figure 22 : Couple électromagnétique de M2 pendant le démarrage

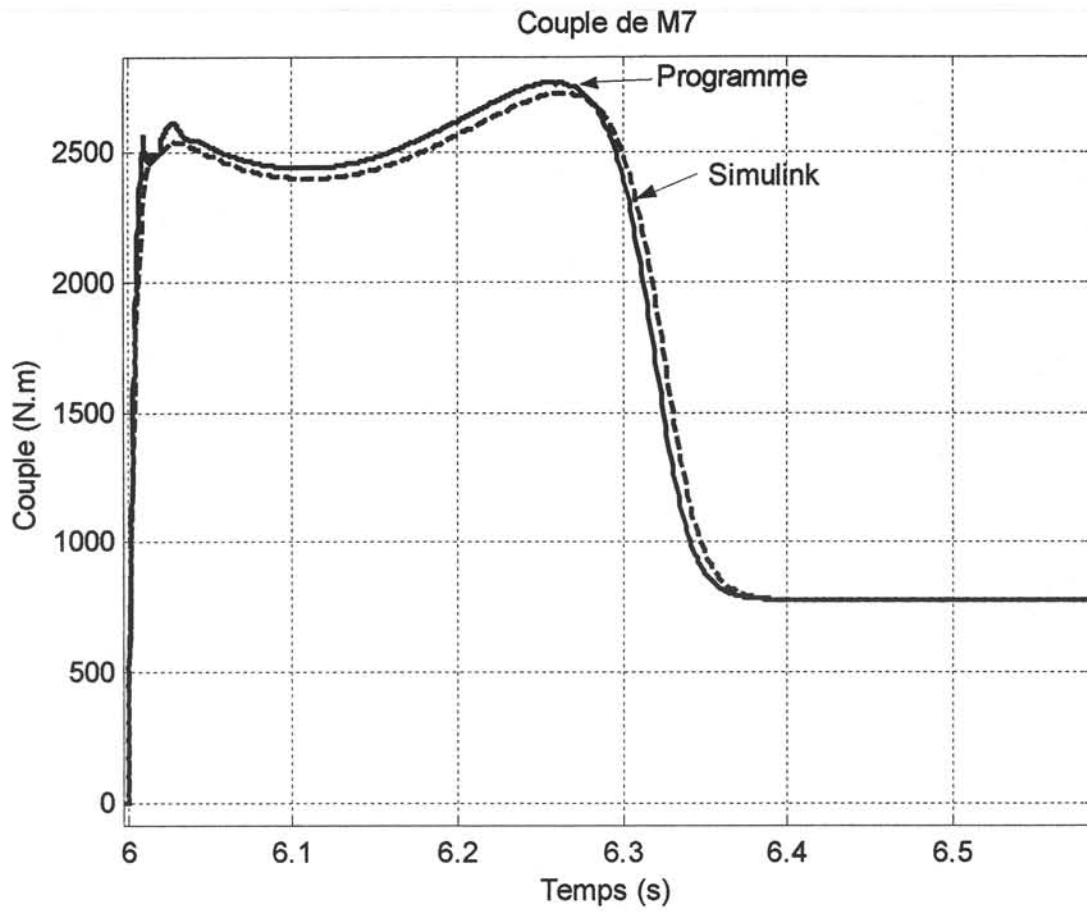


Figure 23 : Couple électromagnétique de M7 pendant le démarrage

5.2 Etude du démarrage instantané de plusieurs moteurs

Il s'agit d'étudier les conséquences du démarrage de plusieurs moteurs simultanément sur les autres moteurs de l'installation.

Les simulations sont faites à partir du réseau précédent, mais avec des valeurs d'impédance de lignes multipliées par 10, ceci pour mieux voir les conséquences du démarrage, car avec les valeurs actuelles, les conséquences du démarrage simultané de plusieurs machines sur les autres machines de l'installation ne sont pas significatives.

Les machines M4, M5, M6 et M7 démarrent au même instant.

Les conséquences de ce démarrage sur la vitesse, le courant et le couple des machines M1, M2 et M3, installées en parallèle des autres machines, sont présentées. Il est à noter également que à $t=5s$ au moment du démarrage simultanés des machines M4-M5-M6-M7, les machines M1 et M2 avaient déjà atteint leur régime permanent alors que M3 est toujours en phase de démarrage puisque à $t=3s$ la machine M3 commence à démarrer.

Amplitude de la tension aux bornes de M1 à M7 (V1)

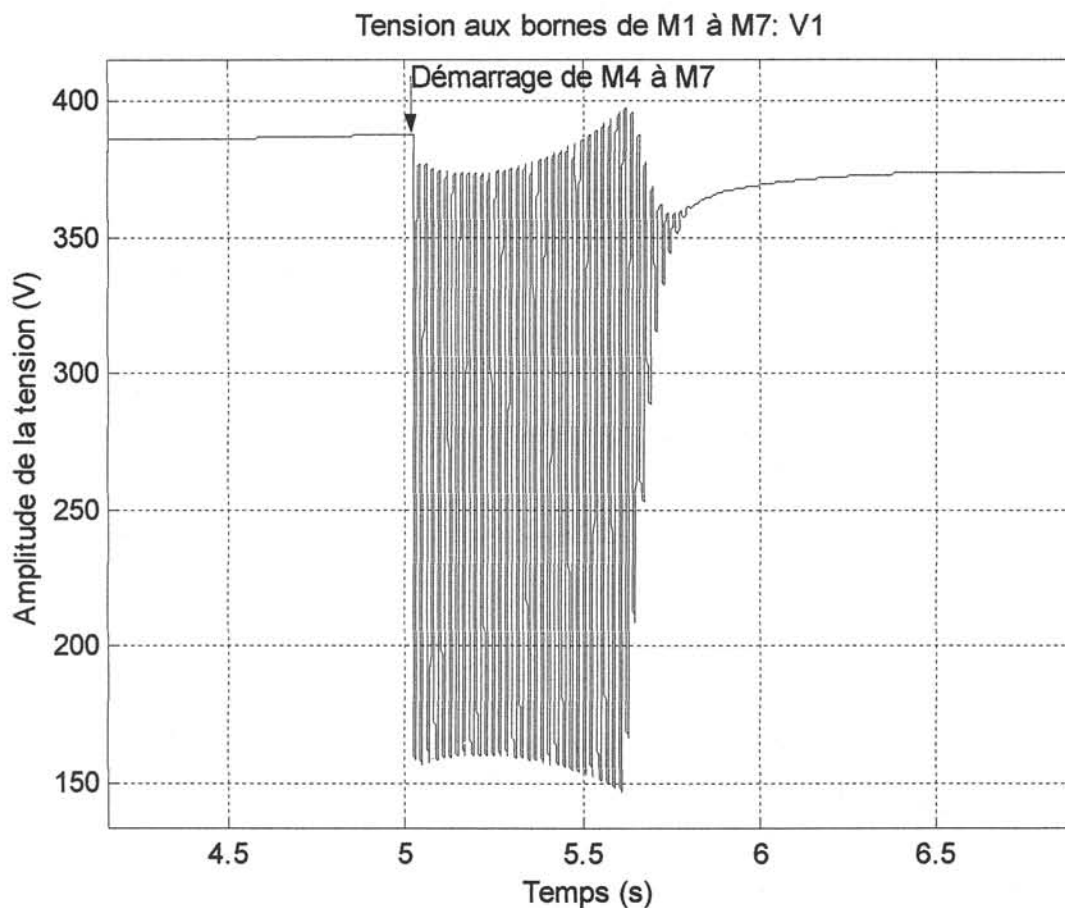


Figure 24 : variation de l'amplitude de la tension V1 suite au démarrage des machines M4 à M7

La Figure 24 présente la variation de l'amplitude de la tension aux bornes de M1, M2 et M3 pendant le démarrage des autres moteurs.

Au début du démarrage, une chute de tension de l'ordre de 60 % de profondeur est observée pour atteindre une profondeur de 6% après la phase de démarrage des 4 machines (M4 à M7). Cette chute de tension présente des conséquences sur les machines notamment une variation de la vitesse, du courant et du couple.

Ces différents aspects seront représentés pour les machines M1, M2 et M3.

5.2.1.1 Variation de la vitesse de M1, M2 et M3

La Figure 25, la Figure 26 et la Figure 27 présentent la variation de la vitesse respectivement des moteurs M1, M2 et M3 pendant le démarrage des autres moteurs.

La chute de tension observée suite au démarrage simultanément des machines M4 à M7, provoque une décélération de la vitesse des machines M1, M2 et M3. Et à la fin du démarrage ces vitesses atteignent une nouvelle valeur de vitesse inférieure à leur valeur initiale.

La machine M2, vu sa plus faible inertie présente des oscillations plus importantes que la machine M1. En effet la charge entraînée par M1 présente un temps de lancée de 5secondes contre 0.2secondes pour la charge entraînée par M2.

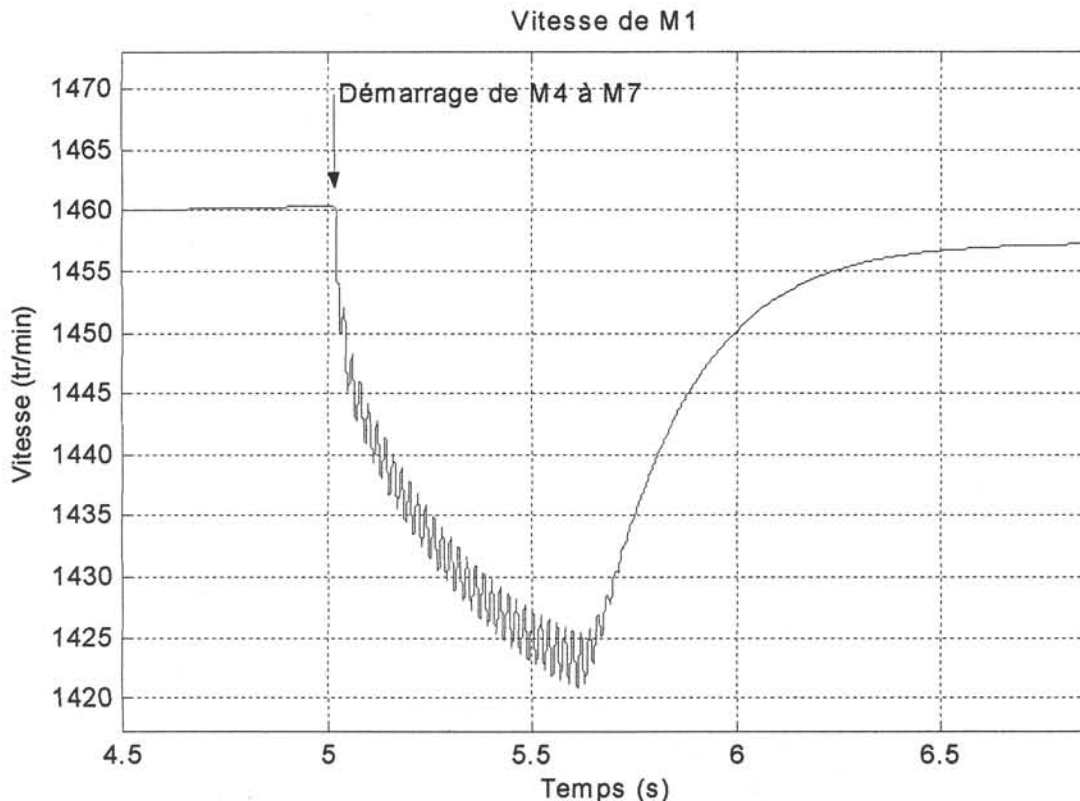


Figure 25 : variation de la vitesse de M2 suite au démarrage de M4 à M7

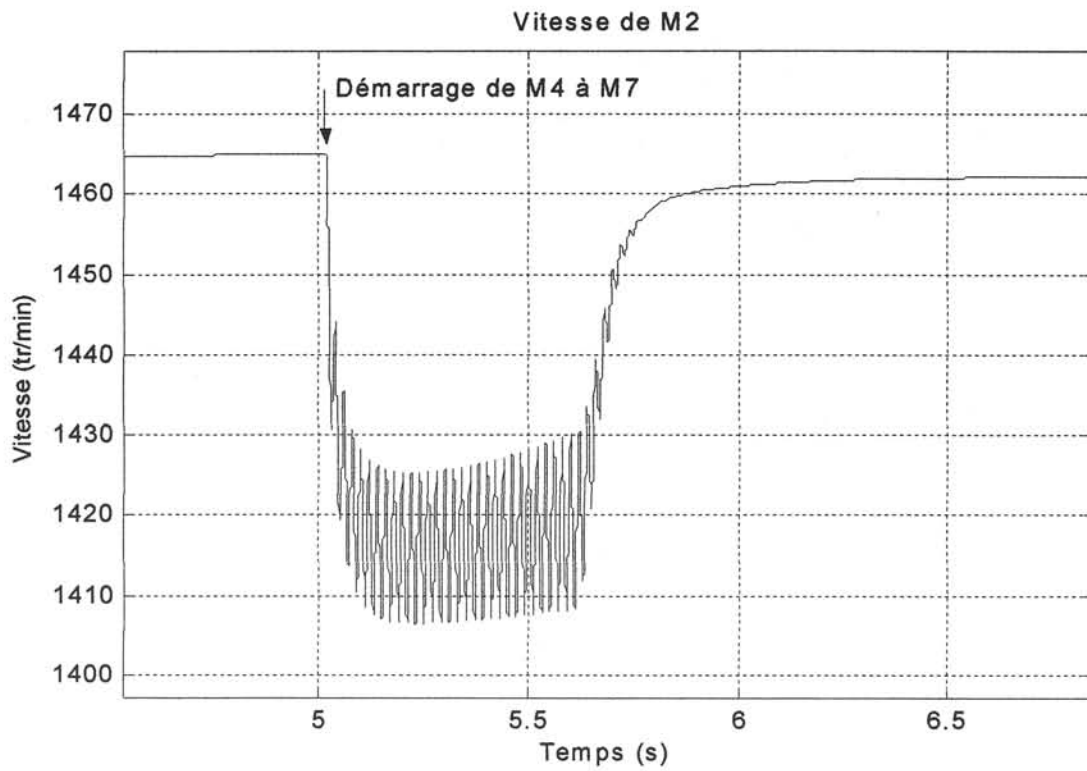


Figure 26 : Variation de la vitesse de M2 suit au démarrage de M4 à M7

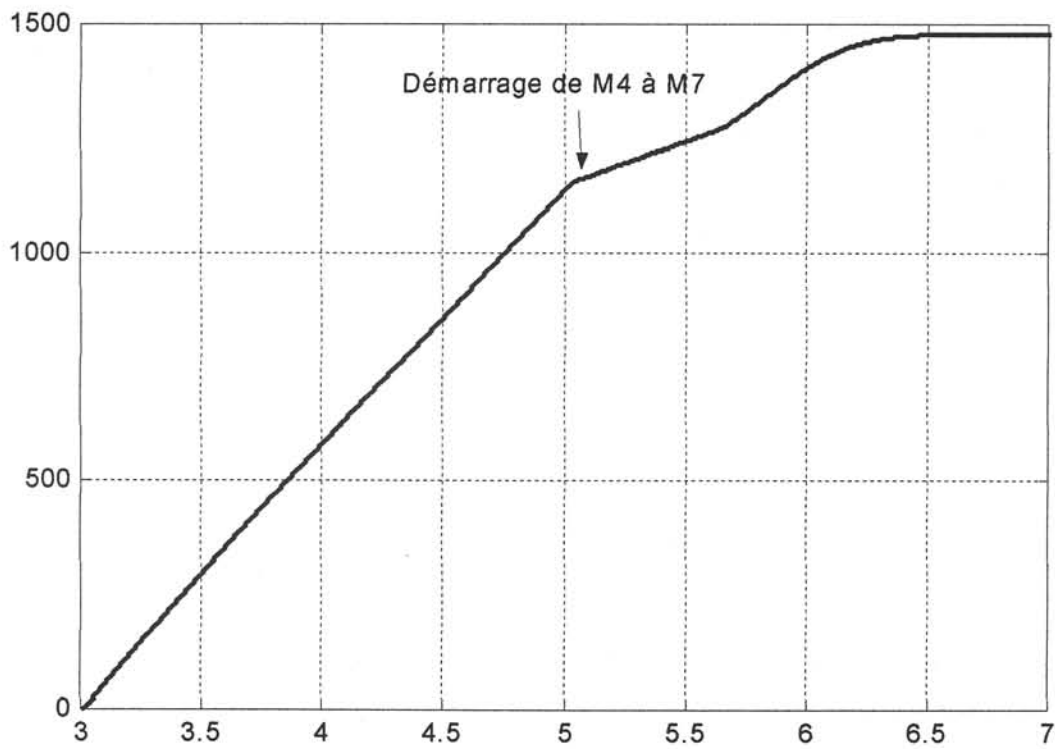


Figure 27 : Variation de la vitesse de M3 suite au démarrage de M4 à M7

La machine M2, vu sa plus faible inertie présente des oscillations plus importantes que la machine M1. En effet la charge entraînée par M1 présente un temps de lancée de 5secondes contre 0.2secondes pour la charge entraînée par M2.

5.2.1.2 Variation de l'amplitude de courant de M1, M2 etM3 pendant le démarrage

La Figure 28 et la Figure 29 présentent la variation de l'amplitude du courant respectivement des machines M1, M2 et M3 pendant le démarrage des autres moteurs.

La chute de tension observée suite au démarrage simultané des machines M4 à M7, provoque un appel de courant des machines M1, M2 et M3. A la fin du démarrage ces courants atteignent une nouvelle valeur supérieure à leur valeur initiale.

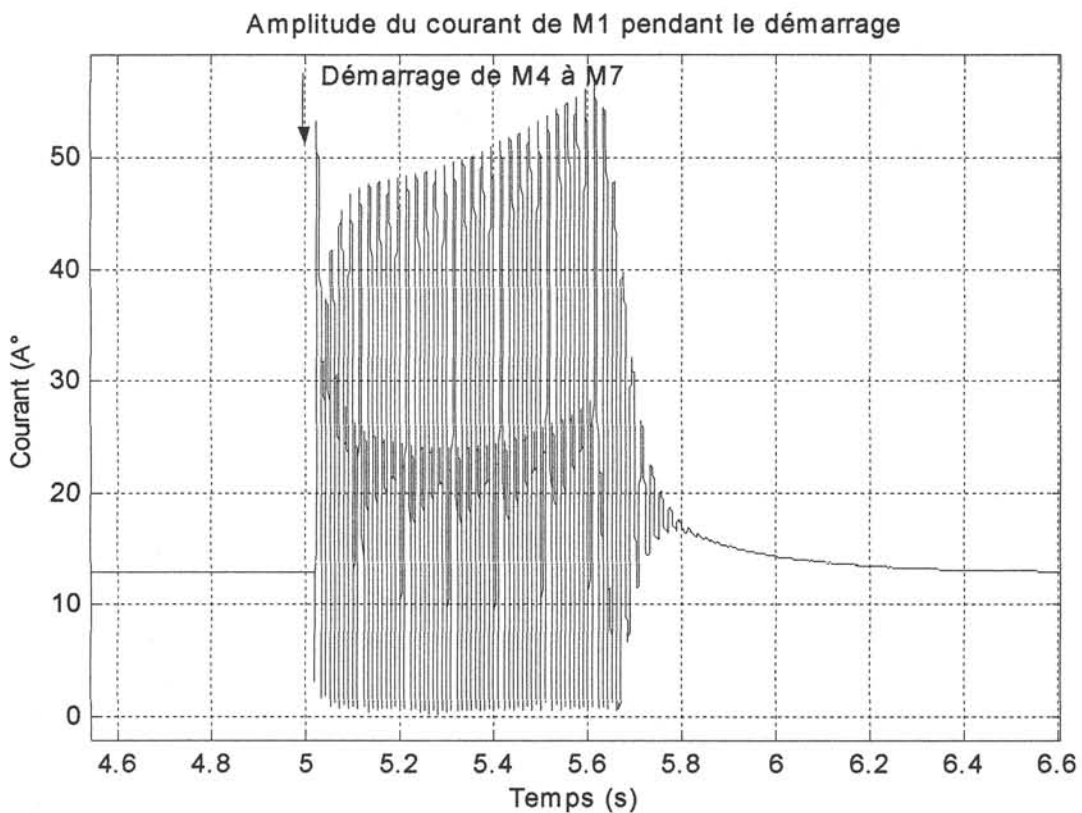


Figure 28 : Variation de l'amplitude de M1 pendant le démarrage

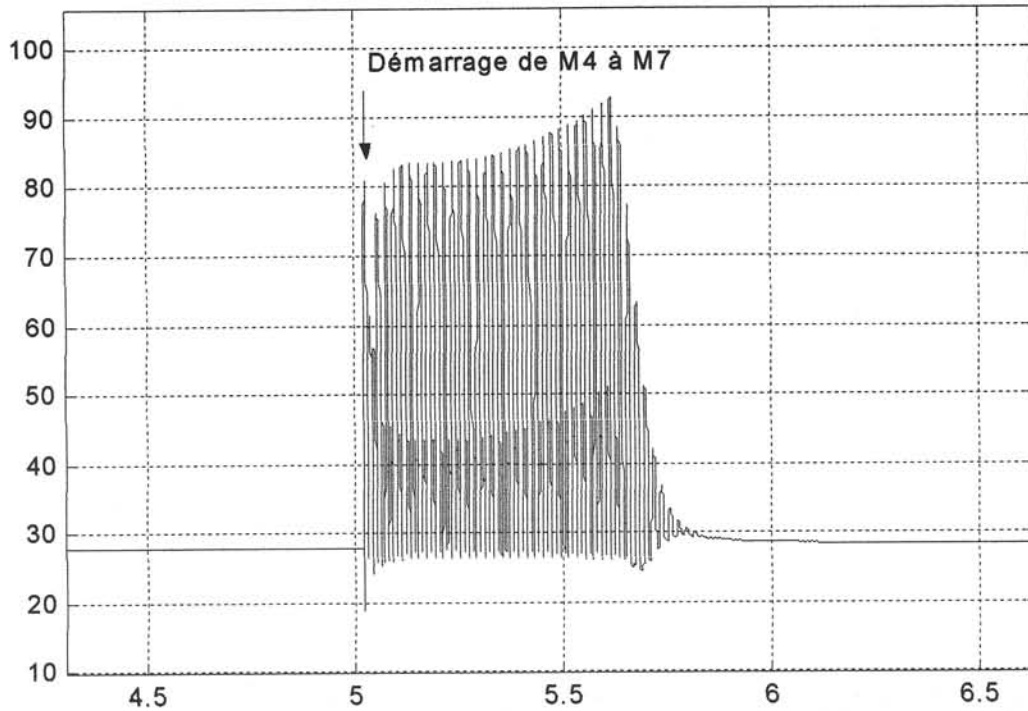


Figure 29 : Variation de l'amplitude du courant de M2 pendant le démarrage de M4 à M7

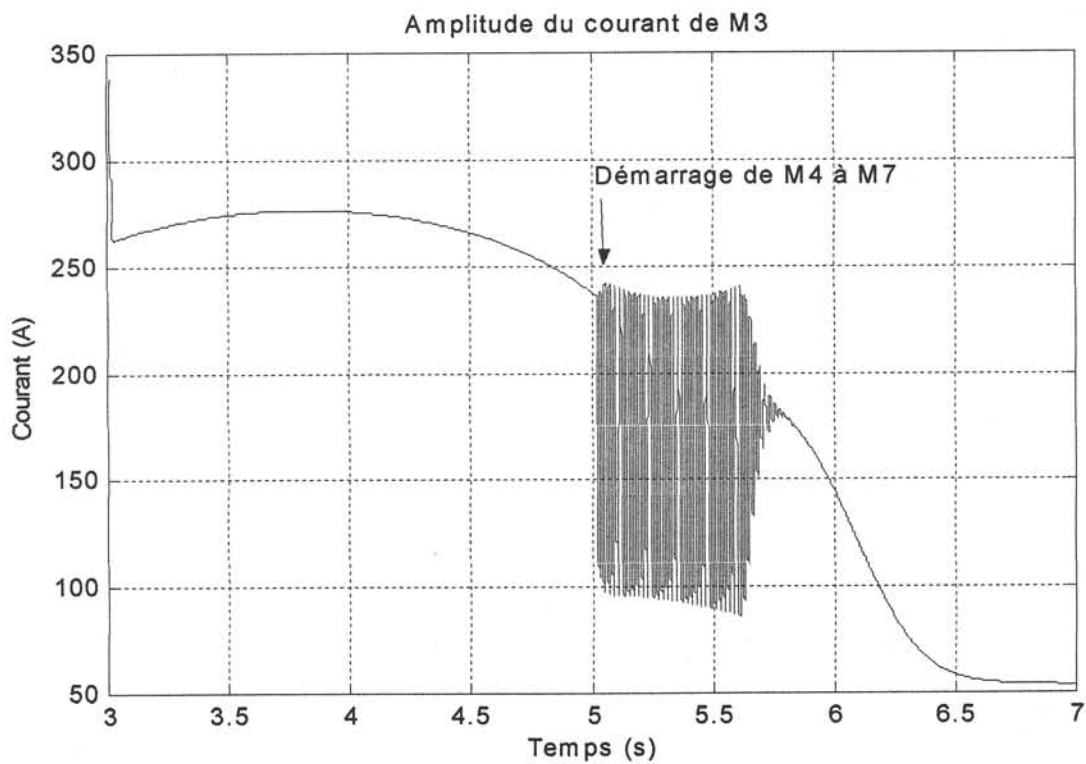


Figure 30: Variation du courant de M3 pendant démarrage de M4 à M7

5.2.1.3 Variation du couple en fonction du temps de M1, M2 et M3 pendant le démarrage

La Figure 31 et la Figure 32 présentent la variation de l'amplitude du couple électromagnétique en fonction du temps respectivement des machines M1, M2 et M3, pendant le démarrage des autres moteurs.

La chute de tension observée suite au démarrage simultané des machines M4 à M7, provoque une variation du couple des machines M1, M2 et M3. Au début du démarrage, on observe un appel de couple plus important, et à la fin de la phase de démarrage le couple atteint une nouvelle valeur constante pour les machines M1 et M2 alors que la machine M3 est toujours en phase de démarrage.

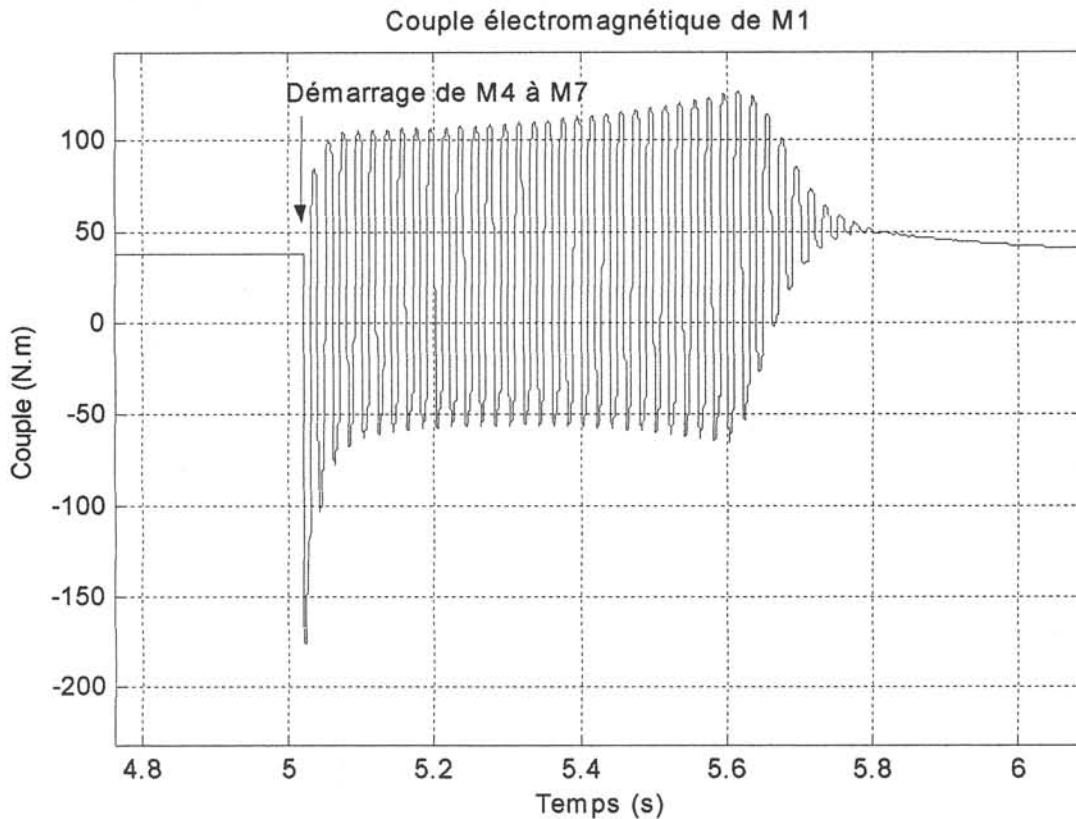


Figure 31 : Variation du couple électromagnétique de M1 en fonction du temps pendant le démarrage de M4 à M7

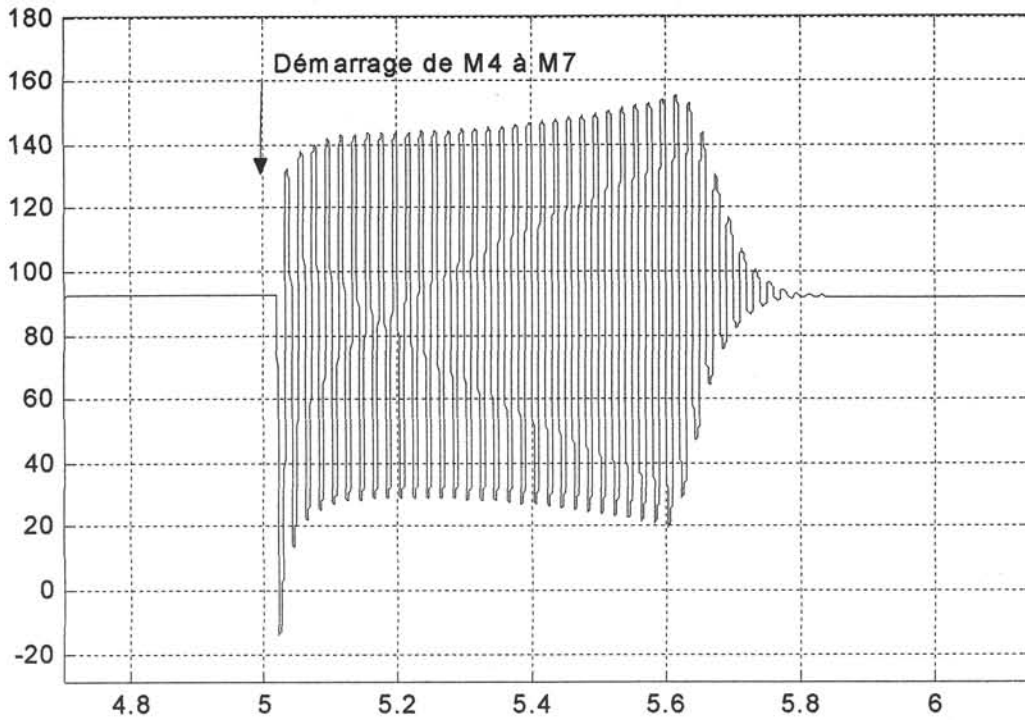


Figure 32 : Variation du couple électromagnétique de M2 pendant le démarrage de M4 à M7

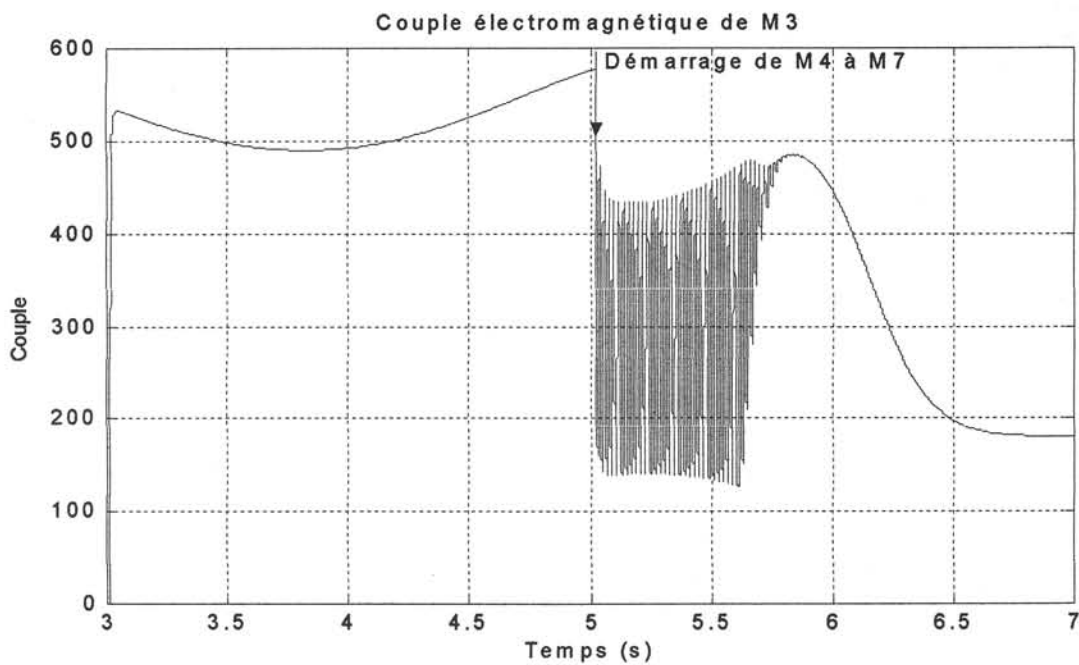


Figure 33 : Variation du couple électromagnétique de M3 pendant le démarrage de M4 à M7

6 Conclusion

Cette validation a consisté à comparer les valeurs des amplitudes de la tension aux différents nœuds, les appels de courant et de couple ainsi que les variations de vitesse. Les deux scénarii testés sont l'apparition d'un creux triphasé au nœud source et les conséquences du démarrage simultané de plusieurs machines. Ces deux cas sont représentatifs des deux origines possibles de creux de tension : côté distributeur et côté client.

Il est à noter que les différences entre les deux résultats sont insignifiantes pour la grandeur mécanique qu'est la vitesse. Toutefois, ce n'est pas le cas pour les courants notamment à l'apparition du creux et au moment du rétablissement de la tension. Notre algorithme étant basé sur des modèles invariants en temps, et des lignes à constantes localisées et statiques, il est nettement plus rapide que Matlab/Simulink. Nous rappelons avoir constaté un rapport de 20 à 100 selon le pas de calcul utilisé en terme de rapidité entre les deux logiciels.

D'autres validations peuvent être menées sur la base d'autres scénarii tels que les creux déséquilibrés, les court circuits... Toujours dans une optique d'enrichissement du proto logiciel des modèles de récepteurs sont à l'étude, il en va de même pour les protections qui y seront intégrées.

Conclusion générale

Le travail présenté a trait au développement d'un outil informatique destiné à l'étude de la propagation des creux de tension dans les réseaux industriels.

Comme pour tout logiciel informatique, les contraintes liées au temps de calcul et à la place mémoire occupée pendant l'exécution du programme sont primordiales et à prendre en compte lors du développement de l'algorithme de base. Ce qui nous a amené à examiner les différents paramètres nécessaires à l'élaboration du logiciel dans le but d'allier fiabilité et rapidité.

L'algorithme de calcul est basé sur la méthode classique de répartition de charge (« Load Flow »). Cette dernière permet, en effet, d'effectuer un calcul statique de la répartition de la tension en fonction de l'appel de puissance au sein d'une installation. Cependant l'aspect dynamique qui peut découler suite à l'apparition d'un creux de tension demeure doit être pris en compte..

A cet effet, une méthode basée sur un calcul répartie en plusieurs pas de temps a été choisie. Il s'agit ainsi d'effectuer à chaque pas de temps un calcul de répartition de charge en se basant sur les valeurs des puissances absorbées aux niveaux des nœuds à la fin du pas précédent. Ce calcul donne en sortie les valeurs des tensions aux différents nœuds. Ces dernières sont appliquées par la suite aux modèles dynamiques des charges correspondantes. Les nouvelles puissances absorbées par les charges présentes dans le réseau sont ainsi calculées et utilisées pour le prochain calcul de répartition de charges.

Parmi les charges industrielles, seule la machine à induction, charge industrielle principale, a été modélisée dans le cadre de cette étude. Différents ordres de modèles dynamiques ont été comparés entre eux, en l'occurrence le 5^{ième}, le 3^{ième}, le 2nd et 1^{er} ordre. Le 2nd ordre a été adopté pour la suite de l'étude comme un bon compromis, permettant de modéliser l'aspect dynamiques des grandeurs électriques et mécaniques, avec le minimum d'équations différentielles possibles.

Afin d'affiner les modèles de machines à induction industrielles, notamment au démarrage, puisque dans la plupart des cas ceux sont des machines à effet de peau, une méthode analytique a été élaborée. Cette méthode permet à partir de l'allure du couple électromagnétique de déterminer la loi de variation de la résistance rotorique en fonction du glissement afin de satisfaire les critères imposés par le modèle à effet de peau notamment la valeur du couple au démarrage. Cette méthode présente également l'avantage de conserver le même ordre pour le modèle dynamique (le 2nd ordre dans ce cas).

En plus de ces différents modèles utilisés pendant le démarrage des machines et à l'apparition d'un creux de tension, un modèle supplémentaire s'est avéré nécessaire pour modéliser le comportement de la machine à induction pendant l'ouverture des protections à ses bornes. En effet, les courants statoriques et rotoriques utilisées dans les modèles dynamiques se présentent comme des variables d'états du système, donc il serait impossible d'annuler le courant statorique de manière discontinue comme lors de l'ouverture des protections.

Les modèles de machines à inductions développés ont donc été utilisés dans l'algorithme général de répartition de charges pour simuler le comportement dynamique de la machine pendant le pas de temps utilisé dans le calcul de répartition de charge. Par la suite sont dégagés les données utiles pour le calcul et pour l'analyse des conséquences des creux de tension.

Une étude de validation de l'algorithme développé, basée sur un réseau comprenant 14 machines à induction, est présentée. Le modèle de validation a été développé sur Matlab/Simulink. L'étude comparative a été menée en prenant comme scénario un creux de tension de profondeur 30% au niveau de la tension d'alimentation.

Les résultats de validation se sont avérés très satisfaisants du point de vue évolution dynamique et ont permis d'évaluer le gain dans le temps de calcul qui s'élève à un rapport compris entre 20 et 100.

Finalement, une étude présentant les conséquences d'un creux de tension généré par le démarrage simultané de plusieurs moteurs de l'installation est présentée.

Il serait utile pour la suite de l'étude de définir le scénario de déclenchement des protections lors de l'apparition d'un creux de tension. Cependant le problème devient plus délicat dès lors que l'ouverture s'effectue au niveau de plusieurs machines qui demeurent connectées en parallèle après l'ouverture. Dans ce cas, le problème d'interaction entre les différentes machines en parallèles influence le comportement global de l'installation. Une approche de type agrégation de charges dynamique pourrait s'avérer utile pour ce genre de problème.

Enfin, comme tout proto logiciel, des améliorations devront être menées sur deux aspects : l'enrichissement de la bibliothèque de modèles et la construction de l'interface homme machine.

Annexe 1 : Transformation des grandeurs triphasés dans le repère de Park

Annexe 1 : Transformation des grandeurs triphasés dans le repère de Park

Soit A la matrice de transformation des grandeurs triphasées (a,b,c) aux grandeurs dans le repère (d,q,0) :

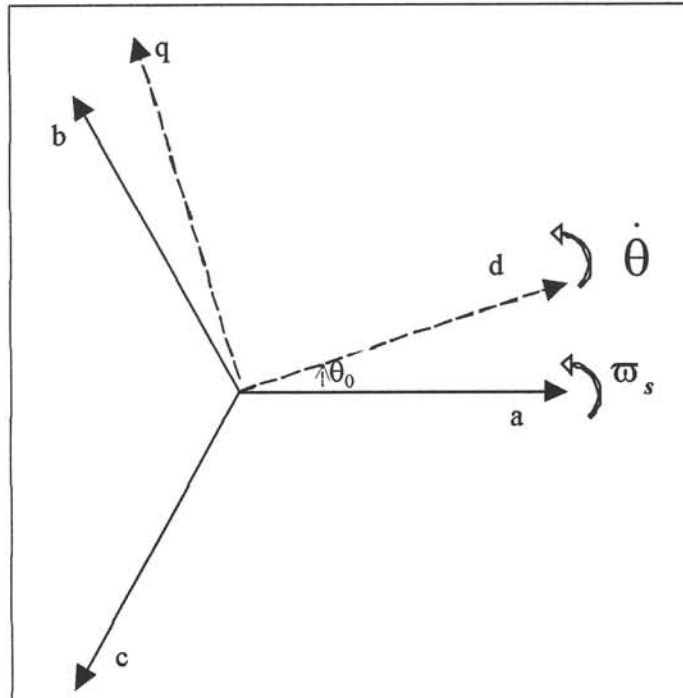


Figure 1: Repères triphasé (a,b,c) et de Park (d,q)

$$A = k_a * \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ k' & k' & k' \end{bmatrix}$$

$$\theta = \dot{\theta}t + \theta_0$$

K_a et K' sont des constantes à déterminer ultérieurement.

$$\begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \\ v_{os} \end{bmatrix} = A^* \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}$$

V_a , V_b et V_c représentent les tensions d'alimentation des trois phases (a , b et c).

D'où

$$v_{ds} = k_a [V_a \cos(\theta) + V_b \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) + V_c \cos(\theta + \frac{2\pi}{3})]$$

$$v_{qs} = k_a [-V_a \sin(\theta) - V_b \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) - V_c \sin(\theta + \frac{2\pi}{3})]$$

et dans le cas où le système triphasé est équilibré $V_{os}=0$.

Détermination de K_a

Si les puissances sont conservées par la transformation :

$$P = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c = v_{ds} i_{ds} + v_{qs} i_{qs} + v_{os} i_{os}$$

$$\Rightarrow P = [v_a, v_b, v_c]^t [i_a, i_b, i_c] = [v_{ds}, v_{qs}, v_{os}]^t [A^{-1}]^t [A^{-1}] [i_{ds}, i_{qs}, i_{os}]$$

$$\Rightarrow [A^{-1}]^t [A^{-1}] \text{ est de la forme suivante } \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Or

$$A^{-1} = \frac{1}{K_a} * \begin{bmatrix} \frac{2}{3} \cos(\theta) & -\frac{2}{3} \sin(\theta) & \frac{1}{3k'} \\ \frac{2}{3} \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\frac{2}{3} \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{3k'} \\ \frac{2}{3} \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\frac{2}{3} \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{3k'} \end{bmatrix}$$

$$\Rightarrow [A^{-1}]^t [A^{-1}] = \frac{1}{K_a^2} * \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{2}{3} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{3(k')^2} \end{bmatrix}$$

$$\Rightarrow K_a = \sqrt{\frac{2}{3}} \text{ et } K' = \sqrt{\frac{1}{2}}$$

Par conséquent :

$$v_{ds} = \sqrt{2/3} [V_a \cos(\theta) + V_b \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) + V_c \cos(\theta + \frac{2\pi}{3})]$$

$$v_{qs} = \sqrt{2/3} [-V_a \sin(\theta) - V_b \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) - V_c \sin(\theta + \frac{2\pi}{3})]$$

Calcul de v_{ds} et v_{qs} dans un repère tournant à la vitesse w_s :

Le repère (d,q) est considéré tournant à la vitesse w_s .

$$\Rightarrow \dot{\theta} = w_s$$

$\Rightarrow \theta = w_s t + \theta_0$ (θ_0 étant la position initiale du repère (d,q) par rapport au repère (a,b,c) (voir Figure 1))

$$\text{Soit } \bar{V} = v_{ds} + jv_{qs}$$

$$\Rightarrow \bar{V} = \sqrt{\frac{2}{3}} (V_a e^{-j\theta} + V_b e^{-j(\theta - \frac{2\pi}{3})} + V_c e^{-j(\theta + \frac{2\pi}{3})})$$

$$\Rightarrow \bar{V} = \sqrt{\frac{2}{3}} e^{-j\theta} (V_a + V_b e^{j\frac{2\pi}{3}} + V_c e^{-j\frac{2\pi}{3}})$$

Si les tensions constitue un système triphasé équilibré direct :

$$\Rightarrow V_a = V_m \cos(\omega_s t + \alpha) = V_m \frac{e^{j(\omega_s t + \alpha)} + e^{-j(\omega_s t + \alpha)}}{2}$$

$$\Rightarrow V_b = V_m \cos(\omega_s t + \alpha - \frac{2\pi}{3}) = V_m \frac{e^{j(\omega_s t + \alpha - \frac{2\pi}{3})} + e^{-j(\omega_s t + \alpha - \frac{2\pi}{3})}}{2}$$

$$\Rightarrow V_c = V_m \cos(\omega_s t + \alpha + \frac{2\pi}{3}) = V_m \frac{e^{j(\omega_s t + \alpha + \frac{2\pi}{3})} + e^{-j(\omega_s t + \alpha + \frac{2\pi}{3})}}{2}$$

$$\Rightarrow \bar{V} = \sqrt{\frac{2}{3}} V_m e^{-j\theta} \left(\frac{e^{j(\omega_s t + \alpha)} + e^{-j(\omega_s t + \alpha)}}{2} + \frac{e^{j(\omega_s t + \alpha - \frac{2\pi}{3})} + e^{-j(\omega_s t + \alpha - \frac{2\pi}{3})}}{2} + e^{j\frac{2\pi}{3}} + \frac{e^{j(\omega_s t + \alpha + \frac{2\pi}{3})} + e^{-j(\omega_s t + \alpha + \frac{2\pi}{3})}}{2} + e^{-j\frac{2\pi}{3}} \right)$$

$$\Rightarrow \bar{V} = \sqrt{\frac{2}{3}} V_m e^{-j\theta} \left(\frac{e^{j(\omega_s t + \alpha)} + e^{-j(\omega_s t + \alpha)}}{2} + \frac{e^{j(\omega_s t + \alpha)} + e^{-j(\omega_s t + \alpha + \frac{2\pi}{3})}}{2} + \frac{e^{j(\omega_s t + \alpha)} + e^{-j(\omega_s t + \alpha - \frac{2\pi}{3})}}{2} \right)$$

$$\Rightarrow \bar{V} = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{V_m}{2} e^{-j\theta} (3e^{j(\omega_s t + \alpha)} + e^{-j(\omega_s t + \alpha)} (1 + e^{-j\frac{2\pi}{3}} + e^{j\frac{2\pi}{3}}))$$

$$\Rightarrow \bar{V} = \sqrt{\frac{3}{2}} V_m e^{-j\theta} e^{j(\omega_s t + \alpha)} \quad (\text{car } (1 + e^{-j\frac{2\pi}{3}} + e^{j\frac{2\pi}{3}}) = 0)$$

$$\Rightarrow \bar{V} = \sqrt{\frac{3}{2}} V_m e^{-j(\text{ost}+\theta_0)} e^{j(\text{ost}+\alpha)} = \sqrt{\frac{3}{2}} V_m e^{j(\alpha-\theta_0)}$$

$$\Rightarrow \bar{V} = v_{ds} + jv_{qs} = \sqrt{\frac{3}{2}} V_m [\cos(\alpha-\theta_0) + j\sin(\alpha-\theta_0)]$$

$$\Rightarrow v_{ds} = \sqrt{\frac{3}{2}} V_m \cos(\alpha-\theta_0) \text{ et } v_{qs} = \sqrt{\frac{3}{2}} V_m \sin(\alpha-\theta_0)$$

Afin de simplifier les équations, on considère $\theta_0 = \alpha = 0$

$$\Rightarrow v_{ds} = \sqrt{\frac{3}{2}} V_m \text{ et } v_{qs} = 0$$

Calcul de i_{ds} et i_{qs} :

En se basant sur le schéma équivalent triphasé utilisé de la machine à induction

$$\Psi_{ds} = L_s i_{ds} + L_s i_{dr}$$

$$\Psi_{dr} = L_r i_{dr} + L_s i_{ds}$$

$$\Psi_{qs} = L_s i_{qs} + L_s i_{qr}$$

$$\Psi_{qr} = L_r i_{qr} + L_s i_{qs}$$

En éliminant les courants rotoriques, i_{ds} et i_{qs} sont calculés à partir des équations suivantes :

$$i_{ds} = \frac{1}{L_s - \frac{L_s^2}{L_r}} (\Psi_{ds} - \frac{L_s}{L_r} \Psi_{dr})$$

$$i_{qs} = \frac{1}{L_s - \frac{L_s^2}{L_r}} (\Psi_{qs} - \frac{L_s}{L_r} \Psi_{qr})$$

Or

$$\sigma = 1 - \frac{L_s^2}{L_s L_r} = 1 - k^2$$

$$\Rightarrow i_{ds} = \frac{1}{\sigma L_s} (\Psi_{ds} - \frac{L_s}{L_r} \Psi_{dr})$$

$$i_{qs} = \frac{1}{\sigma L_s} (\Psi_{qs} - \frac{L_s}{L_r} \Psi_{qr})$$

$$i_{ds} = \frac{1}{\sigma L_s} (\Psi_{ds} - k^2 \Psi_{dr})$$

⇒

$$i_{qs} = \frac{1}{\sigma L_s} (\Psi_{qs} - k^2 \Psi_{qr})$$

Retour aux grandeurs temporelles

Pour retrouver les grandeurs temporelles à partir des grandeurs dans le repère (d,q) il suffit de faire la transformation inverse :

La matrice qui transforme du repère (a,b,c) au repère de Park lié au stator (ds,qs,os) est la matrice A déjà définie dans cet annexe.

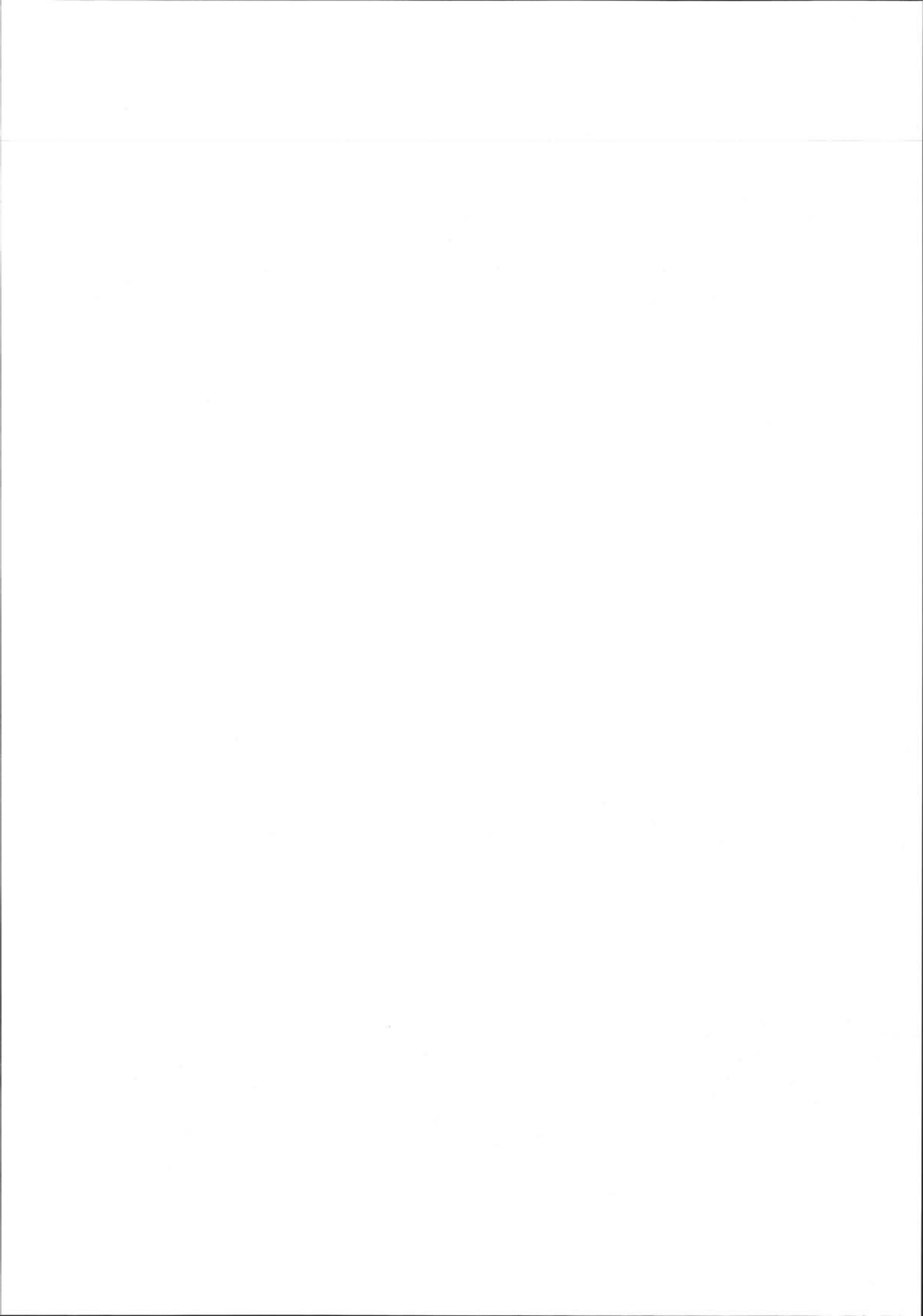
$$A = \sqrt{\frac{2}{3}} * \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sqrt{\frac{1}{2}} & \sqrt{\frac{1}{2}} & \sqrt{\frac{1}{2}} \end{bmatrix}$$

la transformé inverse de A est :

$$A^{-1} = \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{2}{3}} \cos(\theta) & -\sqrt{\frac{2}{3}} \sin(\theta) & \frac{\sqrt{3}}{3} \\ \sqrt{\frac{2}{3}} \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sqrt{\frac{2}{3}} \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{\sqrt{3}}{3} \\ \sqrt{\frac{2}{3}} \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sqrt{\frac{2}{3}} \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \frac{\sqrt{3}}{3} \end{bmatrix}$$

⇒

$$\begin{aligned} x_a &= \sqrt{\frac{2}{3}} \cos(\theta) x_{ds} - \sqrt{\frac{2}{3}} \sin(\theta) x_{qs} + \frac{\sqrt{3}}{3} x_{os} \\ x_b &= \sqrt{\frac{2}{3}} \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) x_{ds} - \sqrt{\frac{2}{3}} \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) x_{qs} + \frac{\sqrt{3}}{3} x_{os} \\ x_c &= \sqrt{\frac{2}{3}} \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) x_{ds} - \sqrt{\frac{2}{3}} \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) x_{qs} + \frac{\sqrt{3}}{3} x_{os} \end{aligned}$$



Annexe 2 : Modélisation du troisième ordre de la machine à induction

Annexe 2 : Modélisation du troisième ordre de la machine à induction

Pour la modélisation du troisième ordre, les transitoires statorique sont négligés
 $\Rightarrow \dot{\Psi}_{ds} = \dot{\Psi}_{qs} = 0$

$$\dot{\Psi}_{dr} = (1/\sigma T_r) \Psi_{ds} + (1/\sigma T_r) \Psi_{dr} + \lambda \Psi_{qr}$$

$$\dot{\Psi}_{qr} = (1/\sigma T_r) \Psi_{qs} - \lambda \Psi_{dr} - (1/\sigma T_r) \Psi_{qr}$$

Équation 1

$$\dot{g} = -(q^* k^2 / \sigma \omega_s T_s R_s J) (\Psi_{qs} \Psi_{dr} - \Psi_{ds} \Psi_{qr}) + (1/J \omega_s) C_{résistant}$$

avec

$$-\dot{\theta} \Psi_{ds} - (1/\sigma T_s) \Psi_{qs} + (k_2/\sigma T_s) \Psi_{qr} + v_{qs} = 0$$

Équation 2

$$-(1/\sigma T_s) \Psi_{ds} + \dot{\theta} \Psi_{qs} + (k_2/\sigma T_s) \Psi_{dr} + v_{ds} = 0$$

En résolvant le système des deux équations à deux inconnues Ψ_{ds} et Ψ_{qs} en (équation 2), on trouve

$$\Psi_{ds} = \frac{1}{1 + (\sigma \omega_s T_s)^2} [k_2 \Psi_{dr} + \sigma k^2 \omega_s T_s \Psi_{qr} + \sigma T_s v_{ds} + \omega_s (\sigma T_s)^2 v_{qs}]$$

et

Équation 3

$$\Psi_{qs} = \frac{1}{1 + (\sigma \omega_s T_s)^2} [-\sigma k^2 \omega_s T_s \Psi_{dr} - k^2 \Psi_{qr} + \omega_s (\sigma T_s)^2 v_{ds} + \sigma T_s v_{qs}]$$

$$\text{soit } m = \frac{1}{1 + (\sigma \omega_s T_s)^2}$$

Et d'après les conventions considérées : $v_{qs} = 0$

D'après l'équation 1 et l'équation 3 on trouve :

$$\dot{\Psi}_{dr} = -(m/T_r)(1 + \sigma \omega_s^2 T_s^2) \Psi_{dr} + (k_2 m \omega_s \frac{T_s}{T_r} + g \omega_s) \Psi_{qr} + (m \frac{T_s}{T_r}) v_{ds}$$

$$\dot{\Psi}_{dr} = -(k_2 m \omega_s \frac{T_s}{T_r} + g \omega_s) \Psi_{dr} - (m/T_r)(1 + \sigma \omega_s^2 T_s^2) \Psi_{qr} - (\sigma m \omega_s \frac{T_s^2}{T_r}) v_{ds}$$

Équation 4

$$\dot{g} = \left(\frac{q k_4 m}{R_s J} \right) (\Psi_{dr}^2 + \Psi_{qr}^2) + \frac{q k_2 m}{\omega_s R_s J} (\sigma \omega_s T_s \Psi_{dr} + \Psi_{qr}) v_{ds} + \frac{1}{J \omega_s} C_{résistant}$$



Annexe 3 : Modélisation du premier ordre de la machine à induction

Annexe 3 : Modélisation du premier ordre de la machine à induction

Pour la modélisation du premier ordre, tous les transitoires électriques sont négligés
 $\Rightarrow \dot{\Psi}_{ds} = \dot{\Psi}_{qs} = \dot{\Psi}_{dr} = \dot{\Psi}_{qr} = 0$

$$\dot{g} = \left(\frac{qk^4 m}{R_s J} \right) (\Psi_{dr}^2 + \Psi_{qr}^2) + \frac{qk^2 m}{\omega_s R_s J} (\sigma \omega_s T_s \Psi_{dr} + \Psi_{qr}) v_{ds} + \frac{1}{J \omega_s} C_{résistant} \quad \text{Équation 1}$$

avec :

$$\Psi_{ds} = \frac{1}{1 + (\sigma \omega_s T_s)^2} [k^2 \Psi_{dr} + \sigma k^2 \omega_s T_s \Psi_{qr} + \sigma T_s v_{ds} + \omega_s (\sigma T_s)^2 v_{qs}]$$

$$\Psi_{qs} = \frac{1}{1 + (\sigma \omega_s T_s)^2} [-\sigma k^2 \omega_s T_s \Psi_{dr} - k^2 \Psi_{qr} + \omega_s (\sigma T_s)^2 v_{ds} + \sigma T_s v_{qs}]$$

et :

$$0 = -(m/T_r)(1 + \sigma \omega_s^2 T_s^2) \Psi_{dr} + (k^2 m \omega_s \frac{T_s}{T_r} + g \omega_s) \Psi_{qr} + (m \frac{T_s}{T_r}) v_{ds}$$

$$0 = -(k^2 m \omega_s \frac{T_s}{T_r} + g \omega_s) \Psi_{dr} - (m/T_r)(1 + \sigma \omega_s^2 T_s^2) \Psi_{qr} - (\sigma m \omega_s \frac{T_s^2}{T_r}) v_{ds}$$

$$\Psi_{dr} = \frac{1}{D} [(m \frac{T_s}{T_r}) f - (\sigma m \omega_s \frac{T_s^2}{T_r}) r] v_{ds}$$

$$\Psi_{qr} = -\frac{1}{D} [(\sigma m \omega_s \frac{T_s^2}{T_r}) f + (m \frac{T_s}{T_r}) r] v_{ds}$$

où :

$$f = \frac{m}{T_r} (1 + \sigma \omega_s^2 T_s^2)$$

$$r = k^2 m \omega_s \frac{T_s}{T_r} + g \omega_s$$

$$D = f^2 + r^2$$

En remplaçant les flux par leur valeur respective dans l'équation mécanique on obtient :

$$\dot{g} = \left(\frac{qk^4 m}{R_s J} \right) [(m \frac{T_s}{T_r})^2 + (\sigma m \omega_s \frac{T_s^2}{T_r})^2] v_{ds}^2 + \frac{qk^2 m}{\omega_s R_s J} (\sigma \omega_s T_s \Psi_{dr} + \Psi_{qr}) v_{ds} + \frac{1}{J \omega_s} C_{résistant}$$

avec

$$\begin{aligned}\Psi_{dr}^2 + \Psi_{qr}^2 &= \left(\frac{1}{D} v_{ds}\right)^2 \left\{ \left(m \frac{T_s}{T_r}\right) f - \left(\sigma m \omega_s \frac{T_s^2}{T_r}\right) g \right\}^2 + \left[\left(\sigma m \omega_s \frac{T_s^2}{T_r}\right) f + \left(m \frac{T_s}{T_r}\right) r \right]^2 \} \\ \Psi_{dr}^2 + \Psi_{qr}^2 &= \left(\frac{1}{D} v_{ds}\right)^2 \left\{ \left(m \frac{T_s}{T_r}\right)^2 f^2 + \left(\sigma m \omega_s \frac{T_s^2}{T_r}\right)^2 r^2 + \left(\sigma m \omega_s \frac{T_s^2}{T_r}\right)^2 f^2 + \left(m \frac{T_s}{T_r}\right)^2 r^2 \right\} \\ \Psi_{dr}^2 + \Psi_{qr}^2 &= \left(\frac{1}{D} v_{ds}\right)^2 \left(\left(m \frac{T_s}{T_r}\right)^2 + \left(\sigma m \omega_s \frac{T_s^2}{T_r}\right)^2 \right) (r^2 + f^2) \\ \Rightarrow \Psi_{dr}^2 + \Psi_{qr}^2 &= \frac{1}{D} \left[\left(m \frac{T_s}{T_r}\right)^2 + \left(\sigma m \omega_s \frac{T_s^2}{T_r}\right)^2 \right] v_{ds}^2\end{aligned}$$

et

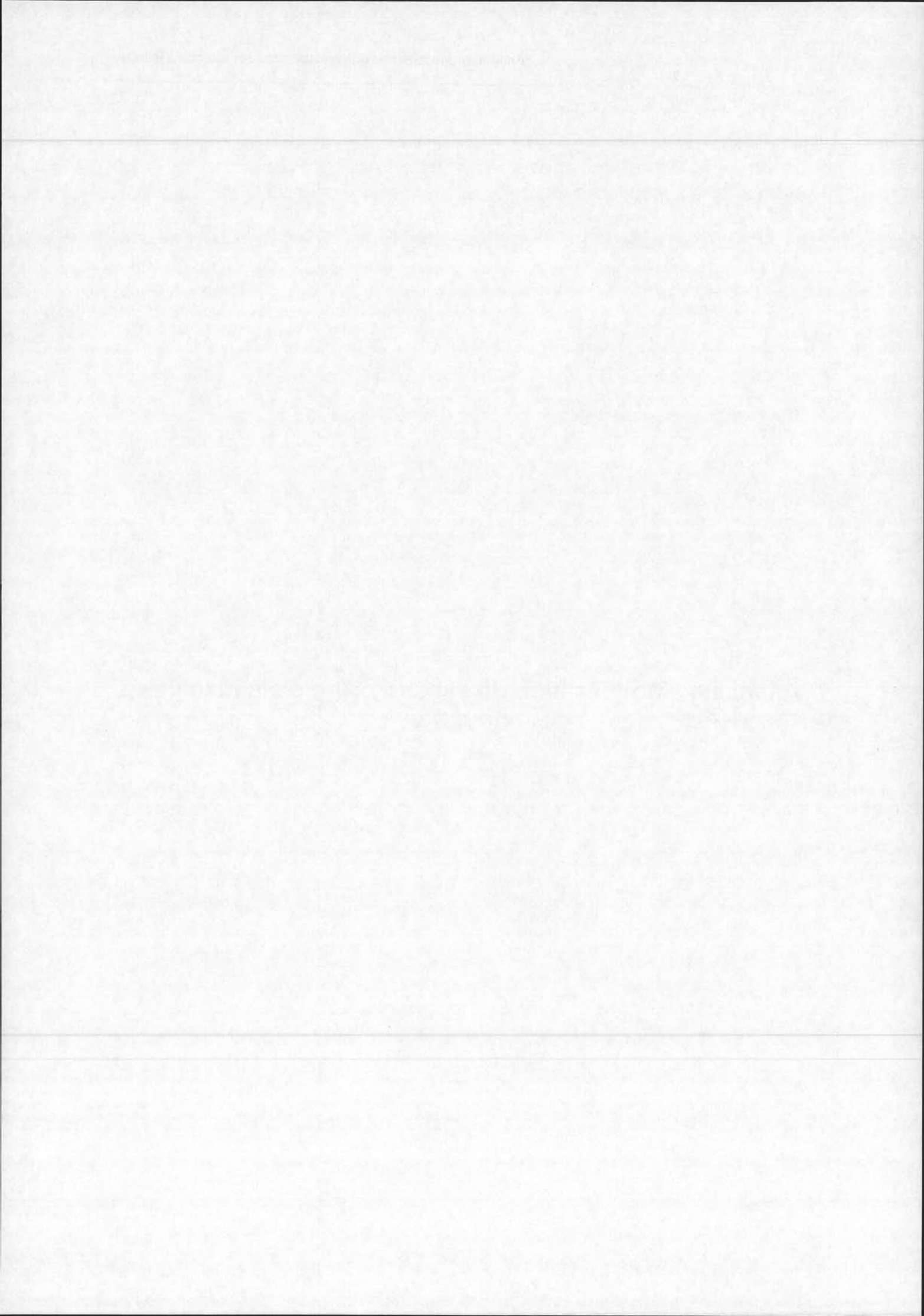
$$\begin{aligned}\sigma \omega_s T_s (\Psi_{dr}) + \Psi_{qr} &= \left(\sigma \omega_s T_s \frac{1}{D} \left[\left(m \frac{T_s}{T_r}\right) f - \left(\sigma m \omega_s \frac{T_s^2}{T_r}\right) r \right] v_{ds}\right) + \left(-\frac{1}{D} \left[\left(\sigma m \omega_s \frac{T_s^2}{T_r}\right) f + \left(m \frac{T_s}{T_r}\right) r \right] v_{ds}\right) \\ &= -\sigma \omega_s T_s \frac{1}{D} \sigma m \omega_s \frac{T_s^2}{T_r} r v_{ds} - \frac{1}{D} \left(m \frac{T_s}{T_r}\right) r v_{ds} \\ &= -\frac{1}{D} \left(m \frac{T_s}{T_r}\right) r v_{ds} (1 + (\sigma \omega_s)^2 T_s^2) \\ &= -\frac{1}{D} \left(\frac{T_s}{T_r}\right) r v_{ds}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Rightarrow \dot{g} &= \left(\frac{qk^4 m}{DR_s J}\right) \left(m \frac{T_s}{T_r}\right)^2 v_{ds}^2 + \left(\frac{qk^4 m}{DR_s J}\right) \left(\sigma m \omega_s \frac{T_s^2}{T_r}\right)^2 - \frac{qk^2 m}{w_s R_s J} \left(\frac{1}{D} \left(\frac{T_s}{T_r}\right) r v_{ds}^2\right) + \frac{1}{J \omega_s} C_{résistant} \\ &= \frac{qk^2 m}{\omega_s R_s J D} \frac{T_s}{T_r} v_{ds}^2 \left[k^2 \omega_s m^2 \frac{T_s}{T_r} v_{ds}^2 + k^2 \omega_s (\sigma m \omega_s)^2 \frac{T_s^3}{T_r} - r \right] + \frac{1}{J \omega_s} C_{résistant} \\ &= \frac{qk^2 m}{\omega_s R_s J} \left(\frac{1}{D} \left(\frac{T_s}{T_r}\right) v_{ds}^2 \left[k^2 \omega_s m^2 \frac{T_s}{T_r} (1 + (\sigma \omega_s T_s)^2) - r \right] + \frac{1}{J \omega_s} C_{résistant}\right) \\ &= \frac{qk^2 m}{\omega_s R_s J D} \frac{T_s}{T_r} v_{ds}^2 \left[k^2 \omega_s m \frac{T_s}{T_r} - r \right] + \frac{1}{J \omega_s} C_{résistant} \\ &= \frac{qk^2 m}{R_s J} \frac{T_s}{T_r} v_{ds}^2 \left(\frac{-g}{f^2 + (k^2 m \omega_s \frac{T_s}{T_r} + g \omega_s)^2} \right) + \frac{1}{J \omega_s} C_{résistant}\end{aligned}$$

Finalement :

$$\dot{g} = \frac{qk^2 m}{R_s J} \frac{T_s}{T_r} v_{ds}^2 \left(\frac{-g}{f^2 + (k^2 m \omega_s \frac{T_s}{T_r} + g \omega_s)^2} \right) + \frac{1}{J \omega_s} C_{résistant}$$

Annexe 4 : Modélisation du second ordre de la machine à induction



Annexe 4 : Modélisation du second ordre de la machine à induction

Dans le modèle du second ordre les transitoires statoriques sont négligés, et les deux équations différentielles relatives aux grandeurs rotoriques sont remplacées par une seule équation .

En effet, on suppose que le rapport $\frac{\Psi_{dr}}{\Psi_{qr}}$ ne dépend que du glissement.

Soit

$$\Psi_r = \sqrt{\Psi_{dr}^2 + \Psi_{qr}^2} .$$

$$\Rightarrow \dot{\Psi}_r = \left(\frac{\Psi_{dr}}{\Psi_r}\right)\dot{\Psi}_{dr} + \left(\frac{\Psi_{qr}}{\Psi_r}\right)\dot{\Psi}_{qr}$$

$$\frac{\Psi_{dr}}{\Psi_r} = \frac{\Psi_{dr}}{\sqrt{\Psi_{dr}^2 + \Psi_{qr}^2}} \text{ et } \frac{\Psi_{qr}}{\Psi_r} = \frac{\Psi_{qr}}{\sqrt{\Psi_{dr}^2 + \Psi_{qr}^2}}$$

avec

$$\Psi_{dr} = \frac{1}{D} \left[\left(m \frac{T_s}{T_r} \right) f - \left(\sigma m \omega_s \frac{T_s^2}{T_r} \right) r \right] v_{ds}$$

$$\Psi_{qr} = -\frac{1}{D} \left[\left(\sigma m \omega_s \frac{T_s^2}{T_r} \right) f + \left(m \frac{T_s}{T_r} \right) r \right] v_{ds}$$

où

$$f = \frac{m}{T_r} (1 + \sigma \omega_s^2 T_s^2)$$

$$r = k^2 m \omega_s \frac{T_s}{T_r} + g \omega_s$$

$$D = f^2 + r^2$$

En remplaçant f et r par leur expression et k^2 par $1 - \sigma$ on trouve :

Expression de Ψ_{dr}

$$\Psi_{dr} = \frac{1}{D} \left[\left(m \frac{T_s}{T_r} \right) \frac{m}{T_r} (1 + \sigma \omega_s^2 T_s^2) - (\sigma m \omega_s \frac{T_s^2}{T_r}) (k^2 m \omega_s \frac{T_s}{T_r} + g \omega_s) \right] v_{ds}$$

$$\Psi_{dr} = \frac{1}{D} \left[\left(m \frac{T_s}{T_r} \right) \frac{m}{T_r} (1 + \sigma \omega_s^2 T_s^2) - (\sigma m \omega_s \frac{T_s^2}{T_r}) ((1 - \sigma) m \omega_s \frac{T_s}{T_r} + g \omega_s) \right] v_{ds}$$

$$\Psi_{dr} = \frac{1}{D} \left[\left(m^2 \frac{T_s}{T_r^2} \right) (1 + \sigma \omega_s^2 T_s^2) - (\sigma \omega_s^2 m^2 \frac{T_s^3}{T_r^2}) (1 - \sigma) - (\sigma m \omega_s \frac{T_s^2}{T_r}) g \omega_s \right] v_{ds}$$

$$\Psi_{dr} = \frac{1}{D} \left(m \frac{T_s}{T_r^2} \right) \left[m (1 + \sigma \omega_s^2 T_s^2) - (\sigma \omega_s^2 m T_s^2) (1 - \sigma) - (\sigma \omega_s T_s T_r) g \omega_s \right] v_{ds}$$

$$\Psi_{dr} = \frac{1}{D} \left(m \frac{T_s}{T_r^2} \right) \left[m + (\sigma^2 \omega_s^2 m T_s^2) - (\sigma \omega_s T_s T_r) g \omega_s \right] v_{ds}$$

$$\Psi_{dr} = \frac{1}{D} \left(m \frac{T_s}{T_r^2} \right) \left[m (1 + (\sigma^2 \omega_s^2 T_s^2)) - (\sigma \omega_s T_s T_r) g \omega_s \right] v_{ds}$$

$$\Psi_{dr} = \frac{1}{D} \left(m \frac{T_s}{T_r^2} \right) \left[1 - (\sigma \omega_s^2 T_s T_r) g \right] v_{ds}$$

Expression de Ψ_{qr}

$$\Psi_{qr} = -\frac{1}{D} \left[\left(\sigma m \omega_s \frac{T_s^2}{T_r} \right) \frac{m}{T_r} (1 + \sigma \omega_s^2 T_s^2) + \left(m \frac{T_s}{T_r} \right) ((1 - \sigma) m \omega_s \frac{T_s}{T_r} + g \omega_s) \right] v_{ds}$$

$$\Psi_{qr} = -\frac{1}{D} m \frac{T_s}{T_r^2} \left[(\sigma \omega_s) m T_s (1 + \sigma \omega_s^2 T_s^2) + ((1 - \sigma) m \omega_s T_s + g T_r \omega_s) \right] v_{ds}$$

$$\Psi_{qr} = -\frac{1}{D} m \frac{T_s}{T_r^2} \left[(\sigma \omega_s) m T_s (\sigma \omega_s^2 T_s^2) + m \omega_s T_s + g T_r \omega_s \right] v_{ds}$$

$$\Psi_{qr} = -\frac{1}{D} m \frac{T_s}{T_r^2} \left[(m \omega_s T_s [(\sigma^2 \omega_s^2 T_s^2) + 1]) + g T_r \omega_s \right] v_{ds}$$

$$\Psi_{qr} = -\frac{1}{D} m \frac{T_s}{T_r^2} \left[\omega_s T_s + g T_r \omega_s \right] v_{ds}$$

Finalemment :

$$\frac{\Psi_{dr}}{\Psi_r} = \frac{1 - (\sigma \omega_s^2 T_s T_r) g}{\sqrt{(T_s \omega_s + g T_r \omega_s)^2 + (1 - (\sigma \omega_s^2 T_s T_r) g)^2}}$$

$$\frac{\Psi_{qr}}{\Psi_r} = \frac{(T_s \omega_s + g T_r \omega_s)}{\sqrt{(T_s \omega_s + g T_r \omega_s)^2 + (1 - (\sigma \omega_s^2 T_s T_r) g)^2}}$$

$$\dot{\Psi}_r = \left(\frac{\Psi_{dr}}{\Psi_r} \right) \dot{\Psi}_{dr} + \left(\frac{\Psi_{qr}}{\Psi_r} \right) \dot{\Psi}_{qr}$$

avec :

$$\dot{\Psi}_{dr} = -f \Psi_{dr} + r \Psi_{qr} + \left(m \frac{T_s}{T_r} \right) v_{ds}$$

$$\dot{\Psi}_{qr} = -r \Psi_{dr} - f \Psi_{qr} - \left(\sigma m \omega_s \frac{T_s^2}{T_r} \right) v_{ds}$$

⇒

$$\dot{\Psi}_r = \left(\frac{\Psi_{dr}}{\Psi_r}\right)(-f\Psi_{dr} + r\Psi_{qr}) + \left(m\frac{T_s}{T_r}\right)v_{ds} + \left(\frac{\Psi_{qr}}{\Psi_r}\right)(-r\Psi_{dr} - f\Psi_{qr} - (\sigma m\omega_s \frac{T_s^2}{T_r})v_{ds})$$

$$\dot{\Psi}_r = \left(\frac{\Psi_{dr}}{\Psi_r}\right)(-f\Psi_{dr} + r\Psi_{qr}) + \left(\frac{\Psi_{qr}}{\Psi_r}\right)(-r\Psi_{dr} - f\Psi_{qr}) + \left(m\frac{T_s}{T_r}\right)\left[\frac{\Psi_{dr}}{\Psi_r} - (\sigma\omega_s T_s)\frac{\Psi_{qr}}{\Psi_r}\right]v_{ds}$$

$$\dot{\Psi}_r = \left(\frac{1}{\Psi_r}\right)[(-f\Psi_{dr}^2 + r\Psi_{dr}\Psi_{qr} - r\Psi_{dr}\Psi_{qr} - f\Psi_{qr}^2)] + \left(m\frac{T_s}{T_r}\right)h[1 - (\sigma\omega_s^2 T_s T_r)g + (\sigma\omega_s T_s)(T_s\omega_s + gT_r\omega_s)]v_{ds}$$

$$\dot{\Psi}_r = \left(\frac{-1}{\Psi_r}\right)f[(\Psi_{dr}^2 + \Psi_{qr}^2)] + h\left(m\frac{T_s}{T_r}\right)[1 + \sigma(\omega_s T_s)^2]v_{ds}$$

$$\Rightarrow \dot{\Psi}_r = -f\Psi_r + h\left(m\frac{T_s}{T_r}\right)[1 + \sigma(\omega_s T_s)^2]v_{ds}$$

avec :

$$h = \frac{1}{\sqrt{(T_s\omega_s + gT_r\omega_s)^2 + (1 - (\sigma\omega_s^2 T_s T_r)g)^2}}$$

Détermination de l'équation mécanique :

$$\dot{g} = \left(\frac{qk^4 m}{R_s J}\right)(\Psi_{dr}^2 + \Psi_{qr}^2) + \frac{qk^2 m}{w_s R_s J}(\sigma\omega_s T_s \Psi_{dr} + \Psi_{qr})v_{ds} + \frac{1}{J\omega_s}C_{résistant}$$

$$\dot{g} = \left(\frac{qk^4 m}{R_s J}\right)(\Psi_r^2) + \frac{qk^2 m}{w_s R_s J}h(\sigma\omega_s T_s(1 - \sigma\omega_s^2 T_s T_r g) - (T_s\omega_s + gT_r\omega_s))v_{ds} + \frac{1}{J\omega_s}C_{résistant}$$

$$\dot{g} = \left(\frac{qk^4 m}{R_s J}\right)(\Psi_r^2) + \frac{qk^2 m}{R_s J}h(\sigma T_s - \sigma^2\omega_s^2 T_s^2 T_r g) - (T_s + gT_r)v_{ds} + \frac{1}{J\omega_s}C_{résistant}$$

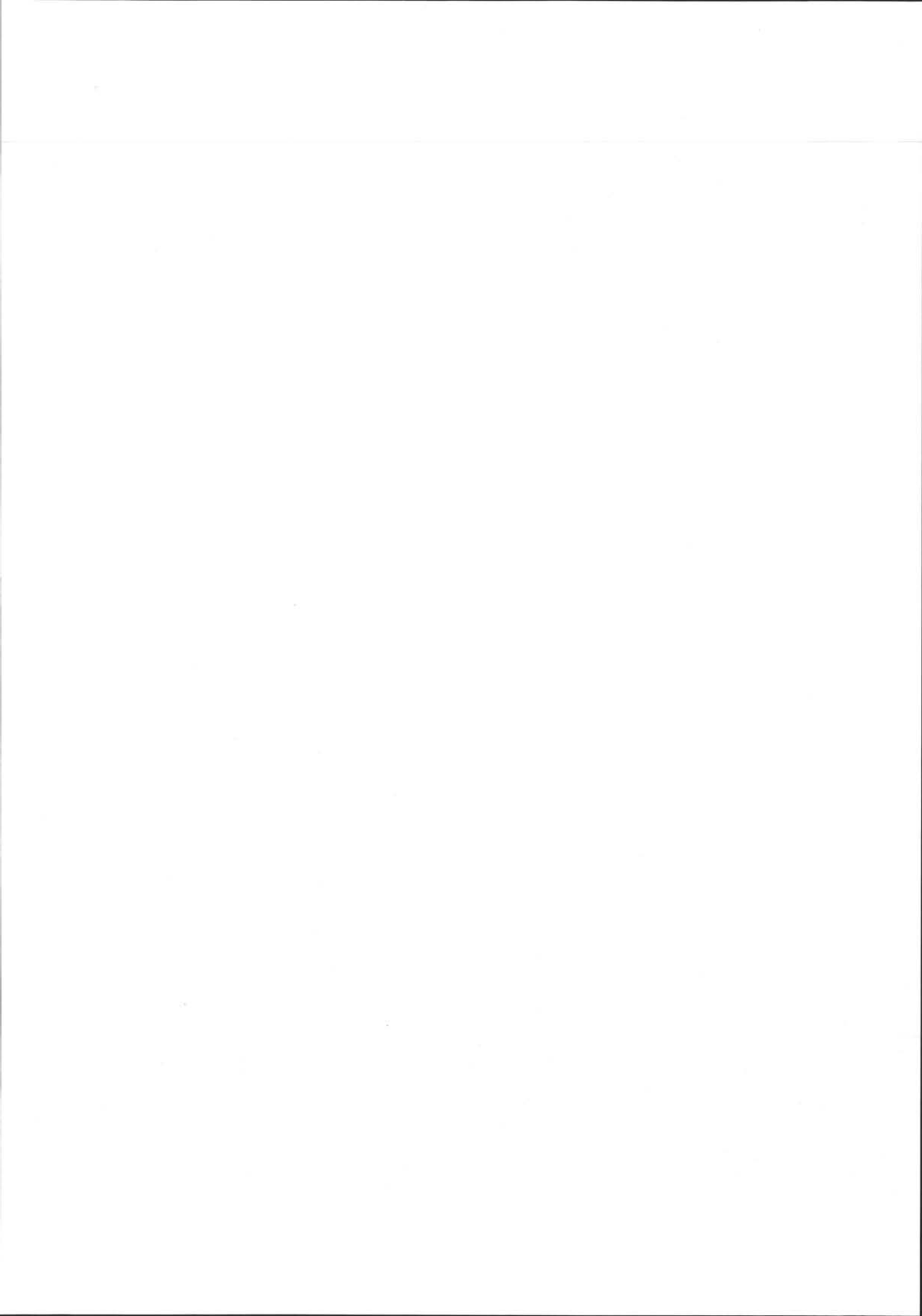
$$\dot{g} = \left(\frac{qk^4 m}{R_s J}\right)(\Psi_r^2) + \frac{qk^2 m}{R_s J}h(T_s(\sigma - 1) - sT_r(1 + \sigma^2\omega_s^2 T_s^2))v_{ds} + \frac{1}{J\omega_s}C_{résistant}$$

$$\dot{g} = \left(\frac{qk^4 m}{R_s J}\right)(\Psi_r^2) - \frac{qk^2}{R_s J}h(mT_s k^2 - gT_r)v_{ds} + \frac{1}{J\omega_s}C_{résistant}$$

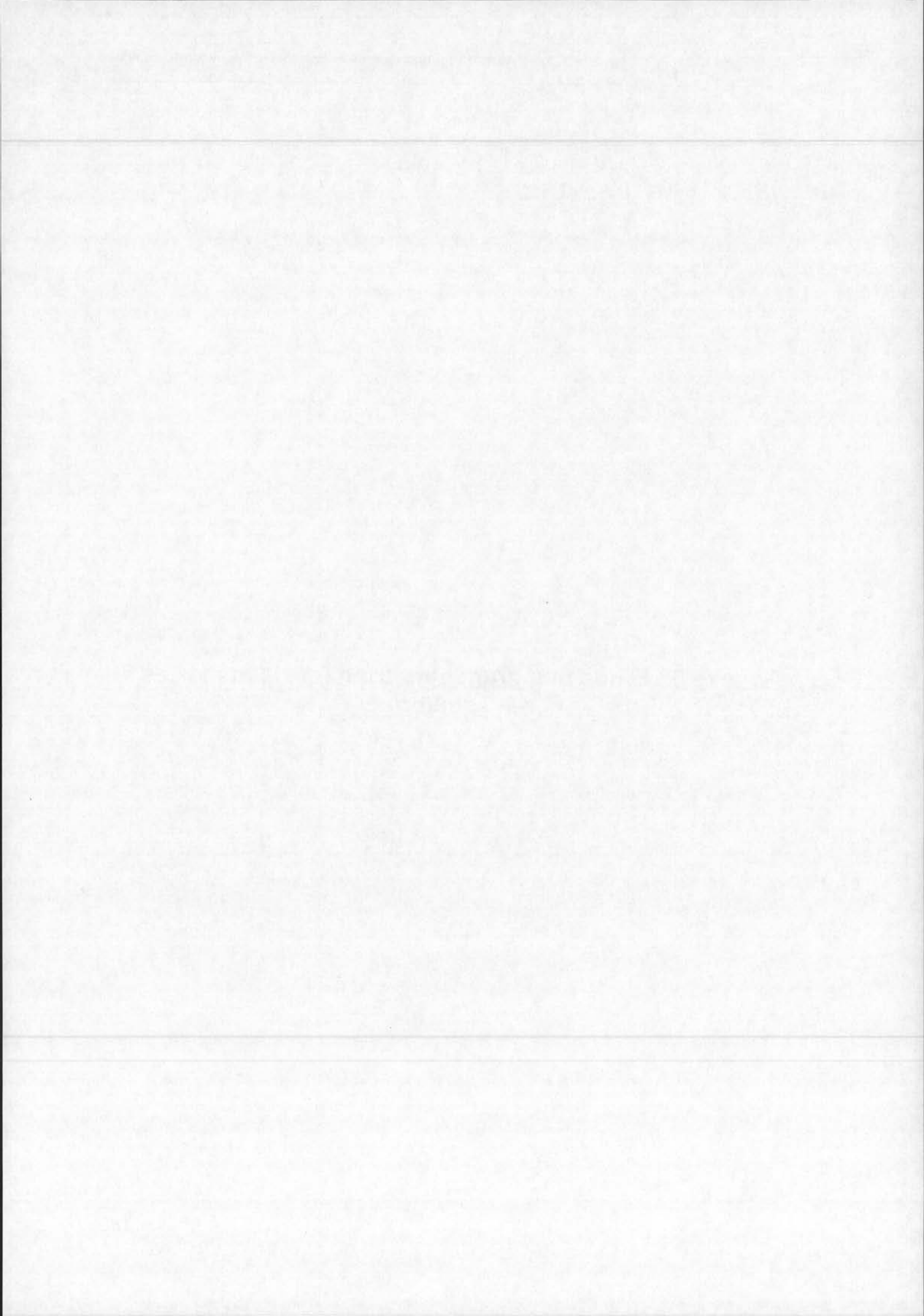
D'où le système d'équation suivant :

$$\dot{\Psi}_r = -\left(\frac{m}{T_r}\right)(1 + \sigma\omega_s^2 T_s^2)\Psi_r + \left(hm\frac{T_s}{T_r}\right)(1 + \sigma\omega_s^2 T_s^2)v_{ds}$$

$$\dot{g} = \left(\frac{qk^4 m}{R_s J}\right)\Psi_r^2 - \left(\frac{qk^2 h}{R_s J}\right)(k^2 m T_s + gT_r)\Psi_r v_{ds} + \frac{1}{J\omega_s}C_{résistant}$$



Annexe 5 : Etude des grandeurs triphasés dans le cas déséquilibré



Annexe 5 : Etude des grandeurs triphasée dans le cas déséquilibré

Détermination des composantes directe inverse et homopolaire

Par définition :

$$\bar{V}_d = \frac{1}{3}(\bar{V}_a + a\bar{V}_b + a^2\bar{V}_c)$$

$$\bar{V}_i = \frac{1}{3}(\bar{V}_a + a^2\bar{V}_b + a\bar{V}_c)$$

$$\bar{V}_o = \frac{1}{3}(\bar{V}_a + \bar{V}_b + \bar{V}_c)$$

Calcul de Vd

$$\bar{V}_d = \frac{1}{3}(\bar{V}_a + a\bar{V}_b + a^2\bar{V}_c)$$

⇒

Module de Vd

$$\|\bar{V}_d\| = \frac{1}{3}(\|\bar{V}_a\| + \|\bar{V}_b\| + \|\bar{V}_c\|)$$

Phase de Vd

Vd est colinéaire à Va,

$$\text{si } \|\bar{V}_a\| > \|\bar{V}_b\| + \|\bar{V}_c\| \Rightarrow \alpha_d = 0$$

$$\text{si } \|\bar{V}_a\| < \|\bar{V}_b\| + \|\bar{V}_c\| \Rightarrow \alpha_d = \pi$$

Calcul de Vi et Vo

$$\bar{V}_i = \frac{1}{3}(\bar{V}_a + a^2\bar{V}_b + a\bar{V}_c)$$

$$\bar{V}_o = \frac{1}{3}(\bar{V}_a + \bar{V}_b + \bar{V}_c)$$

Module de Vi et Vo

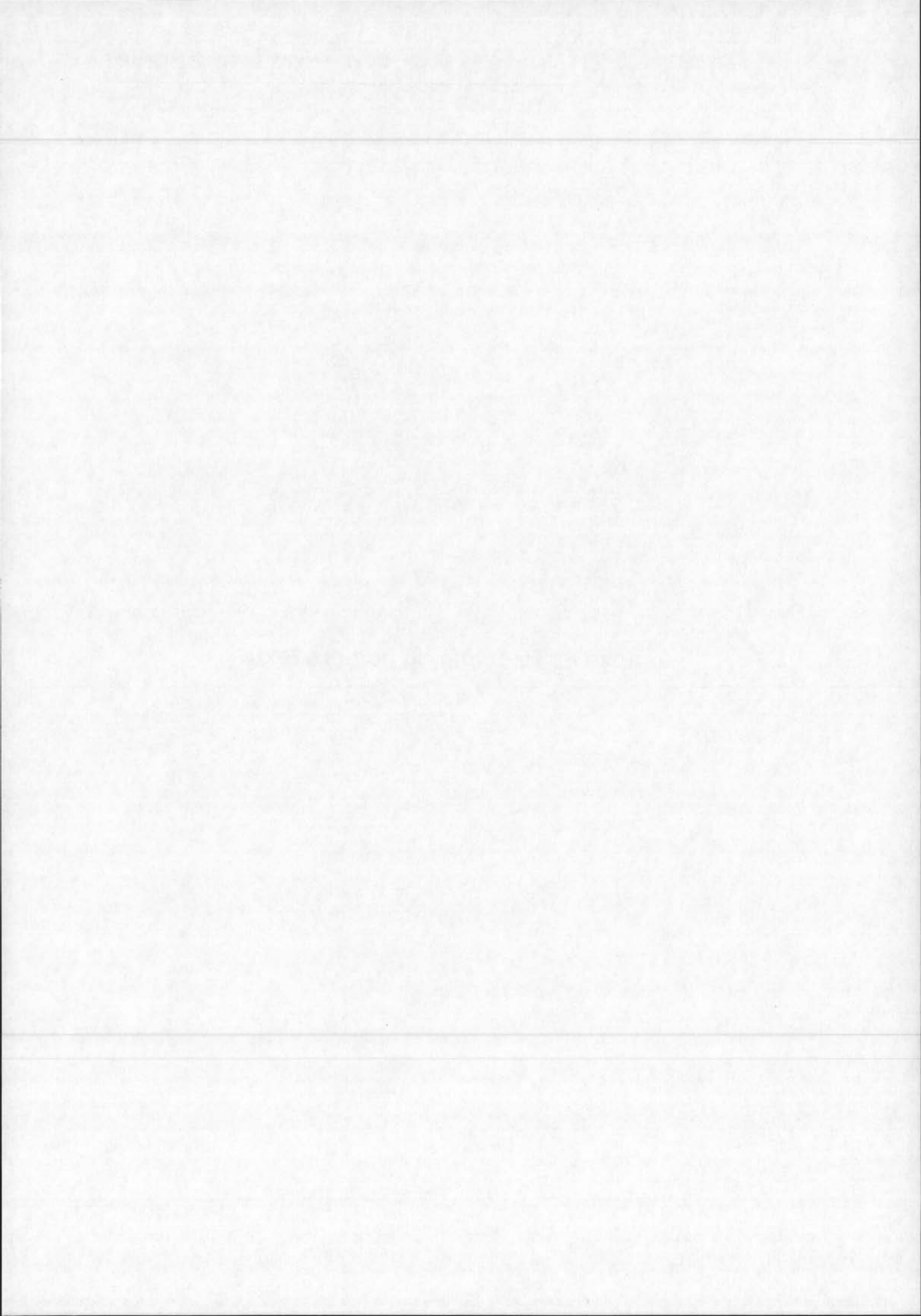
D'après les deux équations précédentes on peut déduire que Vi et Vo ont la même amplitude et que leurs phases sont opposées.

En projetant sur l'axe horizontal et l'axe vertical ($\bar{V}_a + a^2\bar{V}_b + a\bar{V}_c$) ou ($\bar{V}_a + \bar{V}_b + \bar{V}_c$) on trouve :

$$\|P_v\| = \|\bar{V}_a\| - \frac{1}{2}(\|\bar{V}_b\| + \|\bar{V}_c\|)$$

$$\|P_h\| = \frac{\sqrt{3}}{2}|\|\bar{V}_b\| - \|\bar{V}_c\||$$

Annexe 6 : Exemple de fichiers texte



Annexe 6 : Exemple de fichiers texte

Fichier texte : Données du réseau

Architecture du réseau

- Préciser le nombre de niveau dans le réseau : se référer au § 4.1 du chapitre 5 : sémantique de l'indexation
- Pour chaque niveau préciser le nombre maximum de nœud connecté à un nœud de ce niveau .

Introduction de l'amplitude et de la fréquence de la tension source

- Préciser l'amplitude la tension en V
- Préciser la fréquence de la tension en Hz

Emplacement et caractéristiques des transformateurs

- Préciser le nombre de transformateur : N_{transfo}
- Préciser le nœud où se trouve le transformateur i
- Préciser les caractéristiques du transformateur :
 1. Tension nominale U_n
 2. Puissance apparente nominale S_n
 3. Tension de court circuit
 4. Rapport de transformation

Paramètres des lignes du réseaux (Inductance et résistance) et emplacement et nature des charges si elle existe au bout de la ligne à introduire

- Préciser le nombre de ligne dans le réseaux
- Nœud de la ligne i
- Valeur de la résistance et inductance de ligne
- Préciser s'il y a une charge connectée au bout de la ligne. Si oui :
 - Préciser la nature de la charge et ses caractéristiques
Pour les machines asynchrones les caractéristiques à définir sont :
 - Tension
 - Courant

- Puissance
 - Facteur de puissance
 - Couple de démarrage/couple nominal
 - Couple maximal/couple nominal
 - Couple minimum/couple nominal
 - Nombre de paire de pôles
- Emplacements et caractéristiques des protections dans le réseau
 - En introduisant les caractéristiques de la ligne, il faut préciser si la ligne présente un système de protection ainsi que les caractéristiques correspondantes.

Données du réseau

```

1Nombre_de_niveau          4 0 0 0 0 0 0 0 0 0
2Nbr_de_noeud_niv1         2 0 0 0 0 0 0 0 0 0
3Nbr_de_noeud_niv2         1 0 0 0 0 0 0 0 0 0
4Nbr_de_noeud_niv3         2 0 0 0 0 0 0 0 0 0
5Nbr_de_noeud_niv4         7 0 0 0 0 0 0 0 0 0

6Tension_source            36373 0 0 0 0 0 0 0 0 0
7Frequence_reseau          50 0 0 0 0 0 0 0 0 0

8Nombre_de_transfo         3 0 0 0 0 0 0 0 0 0

9Noeud_transfo1            2 1 1 1 1 1 1 1 1 1
10V_Scc_N_k_transfo1       36373 3600000 0.17 0.3175 0 0 0 0 0 0

11Noeud_transfo2           2 2 2 1 1 1 1 1 1 1
12V_Scc_N_k_transfo1       11547 630000 0.04 0.02 0 0 0 0 0 0

13Noeud_transfo2           2 2 3 1 1 1 1 1 1 1
14V_Scc_N_k_transfo1       11547 630000 0.04 0.02 0 0 0 0 0 0

15Nombre_de_lignes         18 0 0 0 0 0 0 0 0 0

16Ind_R_X1_Chrg_PQ         2 1 1 1 1 1 1 1 1 1
17valRX                     1.7 6.1889 0 0 0 0 0 0 0 0
18ma_u_i_p_f_r_ki_kd_km_q  0 0 0 0 1 1 0 0 0 0
19machrg_v_jm_n_tc_CC_gc_color 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0

21Ind_R_X2_Chrg_PQ         2 2 1 1 1 1 1 1 1 1
22valRX                     1.8189 3.2358 0 0 0 0 0 0 0 0
23ma_u_i_p_f_r_ki_kd_km_q  0 0 0 0 1 1 0 0 0 0
24machrg_v_jm_n_tc_CC_gc_color 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0

25Ind_R_X3_Chrg_PQ         2 2 2 1 1 1 1 1 1 1
26valRX                     0.0000000001 0.000000001 0 0 0 0 0 0 0 0
27ma_u_i_p_f_r_ki_kd_km_q  0 0 0 0 1 1 0 0 0 0
28machrg_v_jm_n_tc_CC_gc_color 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0

28Ind_R_X3_Chrg_PQ         2 2 2 2 1 1 1 1 1 1

```

29valRX	0.0000000001 0.000000001 0 0 0 0 0 0 0 0
30ma_u_i_p_f_r_ki_kd_km_q	4 400 15.2 7500 0.84 0.84 7.7 2.7 3.1 2
31machrg_v_jm_n_tc_CC_gc_color	1450 0.0334 2 5 2.6 0.65 1 0 0 0
32Ind_R_X3_Chrg_PQ	2 2 2 3 1 1 1 1 1 1
33valRX	0.0000000001 0.000000001 0 0 0 0 0 0 0 0
34ma_u_i_p_f_r_ki_kd_km_q	4 400 35.1 18500 0.85 0.896 6.7 2.8 2.9 2
35machrg_v_jm_n_tc_CC_gc_color	1455 0.089 2 0.2 2.6 0.69 2 0 0 0
36Ind_R_X3_Chrg_PQ	2 2 2 4 1 1 1 1 1 1
37valRX	0.0000000001 0.000000001 0 0 0 0 0 0 0 0
38ma_u_i_p_f_r_ki_kd_km_q	4 400 67 37000 0.86 0.927 6.8 2.4 2.6 2
39machrg_v_jm_n_tc_CC_gc_color	1475 0.23 2 5 2.2 0.68 3 0 0 0
40Ind_R_X3_Chrg_PQ	2 2 2 5 1 1 1 1 1 1
41valRX	0.0000000001 0.000000001 0 0 0 0 0 0 0 0
42ma_u_i_p_f_r_ki_kd_km_q	4 400 135 75000 0.85 0.941 6.9 2.6 2.7 2
43machrg_v_jm_n_tc_CC_gc_color	1480 1.28 2 0.2 2.4 0.69 4 0 0 0
44Ind_R_X3_Chrg_PQ	2 2 2 6 1 1 1 1 1 1
45valRX	0.0000000001 0.000000001 0 0 0 0 0 0 0 0
46ma_u_i_p_f_r_ki_kd_km_q	4 400 162 90000 0.85 0.946 7.6 2.9 2.9 2
47machrg_v_jm_n_tc_CC_gc_color	1480 1.45 2 0.2 2.8 0.65 5 0 0 0
48Ind_R_X3_Chrg_PQ	2 2 2 7 1 1 1 1 1 1
49valRX	0.0000000001 0.000000001 0 0 0 0 0 0 0 0
50ma_u_i_p_f_r_ki_kd_km_q	4 400 193 110000 0.86 0.955 7.8 2.9 2.9 2
51machrg_v_jm_n_tc_CC_gc_color	1490 2.74 2 0.2 2.7 0.65 6 0 0 0
52Ind_R_X3_Chrg_PQ	2 2 2 8 1 1 1 1 1 1
53valRX	0.0000000001 0.000000001 0 0 0 0 0 0 0 0
54ma_u_i_p_f_r_ki_kd_km_q	4 400 276 160000 0.87 0.961 8.4 3 3.3 2
55machrg_v_jm_n_tc_CC_gc_color	1485 3.37 2 0.2 2.8 0.7 7 0 0 0
56Ind_R_X3_Chrg_PQ	2 2 3 1 1 1 1 1 1 1
57valRX	1.8189 3.2358 0 0 0 0 0 0 0 0
58ma_u_i_p_f_r_ki_kd_km_q	0 0 0 0 1 1 0 0 0 0
59machrg_v_jm_n_tc_CC_gc_color	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
60Ind_R_X3_Chrg_PQ	2 2 3 2 1 1 1 1 1 1
61valRX	0.0000000001 0.000000001 0 0 0 0 0 0 0 0
62ma_u_i_p_f_r_ki_kd_km_q	4 400 15.2 7500 0.84 0.84 7.7 2.7 3.1 2
63machrg_v_jm_n_tc_CC_gc_color	1450 0.0334 2 5 2.6 0.65 8 0 0 0
64Ind_R_X3_Chrg_PQ	2 2 3 3 1 1 1 1 1 1
65valRX	0.0000000001 0.000000001 0 0 0 0 0 0 0 0
66ma_u_i_p_f_r_ki_kd_km_q	4 400 35.1 18500 0.85 0.896 6.7 2.8 2.9 2
67machrg_v_jm_n_tc_CC_gc_color	1455 0.089 2 0.2 2.6 0.69 9 0 0 0
68Ind_R_X3_Chrg_PQ	2 2 3 4 1 1 1 1 1 1
69valRX	0.0000000001 0.000000001 0 0 0 0 0 0 0 0
70ma_u_i_p_f_r_ki_kd_km_q	4 400 67 37000 0.86 0.927 6.8 2.4 2.6 2
71machrg_v_jm_n_tc_CC_gc_color	1475 0.23 2 5 2.2 0.68 10 0 0 0
72Ind_R_X3_Chrg_PQ	2 2 3 5 1 1 1 1 1 1
73valRX	0.0000000001 0.000000001 0 0 0 0 0 0 0 0
74ma_u_i_p_f_r_ki_kd_km_q	4 400 135 75000 0.85 0.941 6.9 2.6 2.7 2
75machrg_v_jm_n_tc_CC_gc_color	1480 1.28 2 0.2 2.4 0.69 11 0 0 0

76Ind_R_X3_Chrg_PQ	2 2 3 6 1 1 1 1 1 1
77valRX	0.0000000001 0.000000001 0 0 0 0 0 0 0 0
78ma_u_i_p_f_r_ki_kd_km_q	4 400 162 90000 0.85 0.946 7.6 2.9 2.9 2
79machrg_v_jm_n_tc_CC_gc_color	1480 1.45 2 0.2 2.8 0.65 12 0 0 0
80Ind_R_X3_Chrg_PQ	2 2 3 7 1 1 1 1 1 1
81valRX	0.0000000001 0.000000001 0 0 0 0 0 0 0 0
82ma_u_i_p_f_r_ki_kd_km_q	4 400 193 110000 0.86 0.955 7.8 2.9 2.9 2
83machrg_v_jm_n_tc_CC_gc_color	1490 2.74 2 0.2 2.7 0.65 13 0 0 0
84Ind_R_X3_Chrg_PQ	2 2 3 8 1 1 1 1 1 1
85valRX	0.0000000001 0.000000001 0 0 0 0 0 0 0 0
86ma_u_i_p_f_r_ki_kd_km_q	4 400 276 160000 0.87 0.961 8.4 3 3.3 2
87machrg_v_jm_n_tc_CC_gc_color	1485 3.37 2 0.2 2.8 0.7 14 0 0 0

Fichier texte pour simuler le démarrage successif des moteurs

1. Préciser s'il y aura démarrage successif de moteurs
2. Le nombre de machine à démarrer ultérieurement
3. Pour chaque moteur :
 - a. Le numéro du nœud sur lequel est connecte le moteur
 - b. Le temps de démarrage

1-machine_à_démarrer_ultérieurement	1 0 0 0 0 0 0 0 0 0
2-Nombre_de_machine_a_demarrer	14 0 0 0 0 0 0 0 0 0
10-Noeud_de_la_machine	2 2 2 2 1 1 1 1 1 1
14-temps_de_demarrage	1 0 0 0 0 0 0 0 0 0
4-Noeud1_de_la_machine	2 2 2 3 1 1 1 1 1 1
8-temps_de_demarrage	1 0 0 0 0 0 0 0 0 0
4-Noeud1_de_la_machine	2 2 2 4 1 1 1 1 1 1
8-temps_de_demarrage	2 0 0 0 0 0 0 0 0 0
4-Noeud1_de_la_machine	2 2 2 5 1 1 1 1 1 1
8-temps_de_demarrage	3 0 0 0 0 0 0 0 0 0
10-Noeud1_de_la_machine	2 2 2 6 1 1 1 1 1 1
14-temps_de_demarrage	4 0 0 0 0 0 0 0 0 0
10-Noeud1_de_la_machine	2 2 2 7 1 1 1 1 1 1
14-temps_de_demarrage	5 0 0 0 0 0 0 0 0 0
10-Noeud1_de_la_machine	2 2 2 8 1 1 1 1 1 1
14-temps_de_demarrage	6 0 0 0 0 0 0 0 0 0
10-Noeud1_de_la_machine	2 2 3 2 1 1 1 1 1 1
14-temps_de_demarrage	8 0 0 0 0 0 0 0 0 0

10-Noeud1_de_la_machine	2 2 3 3 1 1 1 1 1 1
14-temps_de_demarrage	8 0 0 0 0 0 0 0 0 0
10-Noeud1_de_la_machine	2 2 3 4 1 1 1 1 1 1
14-temps_de_demarrage	9 0 0 0 0 0 0 0 0 0
10-Noeud1_de_la_machine	2 2 3 5 1 1 1 1 1 1
14-temps_de_demarrage	10 0 0 0 0 0 0 0 0 0
10-Noeud1_de_la_machine	2 2 3 6 1 1 1 1 1 1
14-temps_de_demarrage	11 0 0 0 0 0 0 0 0 0
10-Noeud1_de_la_machine	2 2 3 7 1 1 1 1 1 1
14-temps_de_demarrage	12 0 0 0 0 0 0 0 0 0
10-Noeud1_de_la_machine	2 2 3 8 1 1 1 1 1 1
14-temps_de_demarrage	13 0 0 0 0 0 0 0 0 0

Fichier texte pour générer des creux de tension

1. Préciser s'il y aura défaillance de la tension
2. La profondeur du creux
3. La durée du creux
4. Temps d'apparition du creux
5. Le pas de calcul pendant la simulation du creux
6. La pente de la tension utilise pendant le couplage statique dynamique : la tension varie entre deux calculs de load flow, la variation suit une loi exponentielle dont le temps de montée correspond a cette valeur.
7. Temps a simuler a partir de la fin du creux (temps de rétablissement)
8. Pas de calcul pendant le rétablissement

1-EST_qu'il_y_aura_defaillance	1
2-Profondeur_du_cieux	30%
3-Durée_du_cieux	0.3
4-Temps_d'apparition	15
5-Pas_de_calcul	0.01
6-Pente_de_la_tension	0.001
7-Durée_du_rétablissement	1
8-Pas_de_calcul_au_retablissement	0.01

Fichier texte : paramètres de simulation

1. Temps de simulation avant démarrage et/ou défaillance source
2. Durée totale a simuler pour les démarrages successifs
3. Pas de calcul pendant les démarrages
4. Temps de montée de la tension pendant les démarrages

1-Simulation_a_partir_de_0_sans_evenement	1
2-Durée_totale_a_partir_de_zero_avec_dem_succe	15
3-Pas_de_calcul_demarrage	0.01
4-Pente_de_variation_de_la_tension	0.001

REFERENCES

- [1] Guide de l'ingénierie électrique (des réseaux internes d'usines) Lavoisier TEC & DOC - Electricité de France ISBN 2-85206-311-5, 1985.
- [2] Philippe FERRACCI, La qualité de l'énergie électrique, Cahier Technique Schneider Electric CT-199, Edition Mai 2000 :
- [3] MHJ Bollen, RAA de Graaf, "Behavior of AC and DC drives during voltage sags with phase-angle jump and three phase unbalance", IEEE PES Winter meeting 1999, Proc.pp12251230
- [4] UTE, Union Technique de L'Electricité et de la Communication UTE : Catalogue sur la Normalisation, 1999.
- [5]]Revue E -114^{ième} année-n° 3/4-98 , Revue d'électricité et d'électronique industrielle : Les grands réseaux industriels : "Conception et comportement dynamique vis-à-vis de perturbations électriques"
- [6] Roger C. Dugan, Mark F. McGranaghan, H. Wayne Beaty, "Electrical Power Systems Quality", McGraw-Hill 1996.
- [7] Le site Internet d'EDF : www.edf.fr
- [8] SOLAND Jacques, "Analyse statistique des creux de tension et stratégie de désensibilisation", Distribution Electric , Service ENERGIE SOLMER.
- [9] GILL G.RICHARDS, OWEN T.TAN , "Simplified Models for Induction Machine Transients under Balanced and Unbalanced Conditions". Transaction on industry applications Vol. IA-17, No.1 January/February 1981.
- [10] Faiz, Keyhani, "Performance Analysis of fast reclosing transiebt in induction motors", IEEE Transactions on Energy Conversion vol.14 No.1 March 1999

-
- [11] N. GALAN, G.CIUMBULEA, S.DELEANU, "Ratings and parameters of induction motor equivalent schemas", ICEM, vol. 3/3 Septembre 2-4 98, Isatanbul (Turkey)
- [12] Patrick BASTARD, Michel MEUNIER (SUPELEC), "Le transit des puissances dans un réseau de transport d'énergie". Revue 3EI Juin 1996.
- [13] DESSOUDE Maxime, "Sensibilité et solutions de désensibilisation des moteurs vis-à-vis des coupures brèves et creux de tension". Note Technique, EDF, DRD. 1998
- [14] G.Garcia Soto, "Numerical and Experimental Determination of an Induction machine Parameters Depending on the Magnetising Current". LGEP-URA CNRS 0127-SUPELEC-
- [15] DESSOUDE Maxime, "Modélisation simplifiée et identifications des paramètres des moteurs asynchrones". Note DRD-EDF 1991
- [16] BACHA Seddik, "La distribution du futur ou une première introspection et une prospective" : note du Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble (LEG).
- [17] Claude GARY, "La foudre; Des mythologies antiques à la recherche moderne", Edition MASSON 1994, ISBN : 2-225-84507-7
- [18] F.DE CHATEAUVIEUX, "PPRD creux de tension et coupures brèves synthèse bibliographique : solution d'insensibilisation ", Note EDF, HR-22/96/041.A
- [19] P.RIOUAL, "Synthèse de la propagation des creux de tension", Note EDF, HR-22/97/041.A
- [20] M.DESSOUDE, "Moteurs asynchrones et perturbations de tension, effets et désensibilisation" Note EDF, HM-19/96/031B
- [21] BAAKLINI I., RETIERE N., GAUDIN C. BACHA Seddik, "Static prediagnosis tool for voltage dips in industrial plant" Electrimacs99, Lisbon.
- [22] BAAKLINI I., RETIERE N., GAUDIN C. BACHA Seddik, "Modelling of industrial induction motors for the pre-diagnosis of voltage dips-ICEM 00 Helsinki." ICEM 00 Helsinki.
- [23] F. DE CHATEAUVIEUX, Groupe de travail UIE Power Quality "Guide sur la qualité de l'électricité pour l'alimentation des installations industrielles" Partie 2 : creux de tension et coupures brèves, Note EDF, HR-22/97/045.A