



HAL
open science

Le filtrage des défauts dans l'analyse de la sécurité dynamique en temps réel des grands réseaux électriques

Sylvain Maginier

► **To cite this version:**

Sylvain Maginier. Le filtrage des défauts dans l'analyse de la sécurité dynamique en temps réel des grands réseaux électriques. Energie électrique. Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 1998. Français. NNT: . tel-00820621

HAL Id: tel-00820621

<https://theses.hal.science/tel-00820621>

Submitted on 6 May 2013

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

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

THESE

présentée par

Sylvain MAGINIER

(Ingénieur E.N.S.I.E.G.)

Pour obtenir le grade de **DOCTEUR**

de l'**INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE**

(Arrêté ministériel du 30 mars 1992)

(Spécialité : Génie Electrique)

**Le filtrage des défauts
dans l'analyse de la sécurité dynamique en temps réel
des grands réseaux électriques**

Date de soutenance : **16 décembre 1998**

Composition du jury :

Messieurs	A. ALMEIDA DO VALE	Rapporteur
	René LE DOEUFF	Rapporteur
	Alain REINE	Examineur
	Jean-Claude SABONNADIÈRE	Examineur
	Nourredine HADJ-SAID	Examineur

Thèse préparée au sein du Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble

REMERCIEMENTS

Je tiens tout particulièrement à remercier :

Monsieur René LE DOEUFF, Professeur à l'Ecole Supérieure Atlantique d'Ingénieurs en Génie Electrique de m'avoir fait l'honneur de présider le jury de cette thèse, et d'avoir accepté d'en être le rapporteur.

Monsieur Alméida Do Vale, Professeur à la faculté d'ingénieurs de l'université de Porto pour avoir accepté d'être le rapporteur de cette thèse.

Monsieur Alain Reine pour avoir accepté d'être membre du jury.

Monsieur Jean-Claude Sabonnadière, Professeur à l'Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs Electriciens de Grenoble pour m'avoir accueilli dans son laboratoire, et avoir accepté d'encadrer cette thèse malgré sa charge de travail très importante.

Monsieur Nourredine Hadj-Saïd, Maître de Conférences à l'Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs Electriciens de Grenoble pour son encadrement efficace, sa disponibilité et ses encouragements.

Monsieur René Feuillet, Professeur à l'Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs Electriciens de Grenoble pour m'avoir accueilli dans son équipe.

Je tiens aussi à remercier tous ceux qui m'ont apporté une aide très précieuse pendant cette thèse (Jean-Christophe Passelergue, Cristian Golovanov, Antoine Jarosz, Sami Ammari...), et sans qui ce travail ne serait pas ce qu'il est.

Enfin, je tiens à remercier tous les membres du laboratoire pour leur accueil, et pour les trois inoubliables années qu'ils m'ont permis de passer.

LEXIQUE

- ASD : Analyse de la Sécurité Dynamique.
- BCU : Boundary of stability region based Controlling Unstable equilibrium point.
- CIA : Centre d'Inertie Angulaire.
- CMR : Critical Machine Ranking.
- EEAC : Extended Equal Area Criterion.
- Ep : Energie potentielle.
- FEM : Force Eletro-Motrice.
- FET : Fonction d'Energie Transitoire.
- MOD : Mode Of Disturbance.
- OMIB : One Machine Infinite Bus System.
- PEI : Point d'Equilibre Instable.
- PES : Point d'Equilibre Stable.
- PEBS : Potential Energy Boundary Surface.
- pu : per unit.
- UEP : Unstable Equilibrium Point
- SLEP : Surface Limite d'Energie Potentielle.
- TE : Temps d'Elimination.
- TEC : Temps d'Elimination Critique.
- Ybus : matrice d'admittance nodale.

SOMMAIRE

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I : ANALYSE DE LA SECURITE DYNAMIQUE EN TEMPS REEL	3
I.1 INTRODUCTION	3
I.2 L'ANALYSE DE LA SECURITE DYNAMIQUE EN TEMPS REEL	3
I.2.1 Présentation	3
I.2.2 Organisation d'un module d'ASD	5
I.3. LES METHODES D'ANALYSE DE LA STABILITE TRANSITOIRE	6
I.3.1 La simulation numérique	7
I.3.2 Les méthodes d'intelligence artificielle	7
I.3.3 Les méthodes directes	9
I.3.3.1 Les méthodes basées sur la fonction d'énergie transitoire	9
a) Principe	9
b) La modélisation classique	12
c) Détermination de la fonction d'énergie transitoire	14
d) Définition du domaine de stabilité	18
e) La méthode "closest UEP (Unstable Equilibrium Point)"	19
f) La méthode PEBS ("Potential Energy Boundary Surface")	20
g) Les méthodes basées sur le "controlling UEP (Unstable Equilibrium Point)"	21
h) Calcul du "controlling UEP"	23
I.3.4 Les méthodes hybrides	25
I.3.4.1 La méthode hybride basée sur la fonction d'énergie transitoire	26
a) Principe	26
b) Calcul du temps d'élimination critique avec la fonction d'énergie transitoire	26
c) Les critères d'arrêt pour la simulation numérique	28
d) Analyse de la méthode hybride FET	28
I.3.4.2 La méthode hybride basée sur la méthode EEAC	28
a) La méthode EEAC ("Extended Equal Area Criterion")	29

b) Analyse de la méthode hybride EEAC	30
I.4 CONCLUSION	31
CHAPITRE II : ETUDE COMPARATIVE DES METHODES D'ANALYSE DE LA STABILITE TRANSITOIRE	32
II.1 CONDITIONS D'ESSAIS	32
II.2 ANALYSE DE LA METHODE PEBS	33
II.2.1 Résultats des tests	33
II.2.2 Analyse des résultats	35
II.3 ANALYSE DE LA METHODE BCU	35
II.3.1 Résultats des tests	36
II.3.2 Analyse des résultats	37
II.4 ANALYSE DE LA METHODE HYBRIDE FET	38
II.4.1 Résultats des tests	39
II.4.2 Analyse des résultats	40
II.5 ANALYSE DE LA METHODE HYBRIDE EEAC	41
II.5.1 Résultats des tests	42
II.5.2 Analyse des résultats	43
II.5.3 Etude de l'identification des machines critiques	45
II.6 CONCLUSION	46
CHAPITRE III : APPLICATION DE LA METHODE PEBS A L'ANALYSE DE LA STABILITE TRANSITOIRE	48
III.1 INTRODUCTION	48
III.2 IDENTIFICATION DES CAUSES D'ERREURS RENCONTRÉES AVEC LES METHODES FET	48
III.3 AMELIORATION DE LA METHODE PEBS	57
III.3.1 Principe	57
III.3.2 Mise en oeuvre de la méthode PEBS individuelle	58
III.3.3 Test de la méthode PEBS individuelle	59
III.3.4 Analyse des résultats	61

III.3.5 Accélération de la méthode PEBS individuelle	63
III.4 CONCLUSION	66
CHAPITRE IV : APPLICATION DES METHODES HYBRIDES A L'ANALYSE DE LA STABILITE TRANSITOIRE	67
IV.1 INTRODUCTION	67
IV.2 AMÉLIORATION DE LA RAPIDITE DES MÉTHODES HYBRIDES	67
IV.2.1 Présentation des critères d'arrêt existants dans la littérature	67
IV.2.1.1 Les critères de stabilité	68
IV.2.1.2 Les critères d'instabilité	68
IV.2.1.3 Conclusion	69
IV.2.2 Développements de critères d'arrêts	70
IV.2.2.1 Mise au point d'un critère de stabilité	70
IV.2.2.2 Conception d'un critère d'instabilité	74
IV.3 AMELIORATION DE LA PRECISION DES METHODES HYBRIDES	77
IV.4 LA METHODE ITERATIVE HYBRIDE	78
IV.4.1 La méthode itérative hybride basée sur la FET	78
IV.4.2 Test de la méthode itérative hybride FET	79
IV.4.3 Accélération de la convergence de la méthode itérative hybride FET	83
IV.4.4 La méthode itérative hybride FET EEAC	87
IV.5 CONCLUSION	91
CHAPITRE V : FILTRAGE DES CONTINGENCES AVEC LA METHODE PEBS INDIVIDUELLE ET LA METHODE ITERATIVE HYBRIDE	93
V.1 ETUDE DE LA VALIDITE DE LA MODELISATION CLASSIQUE	93
V.1.1 Présentation de la modélisation détaillée utilisée	93
V.1.2 Test de la modélisation classique	94
V.1.3 Validité des études de stabilité réalisées sur la première oscillation	97
V.1.4 Conclusion	98
V.2 APPLICATION DE LA METHODE PEBS INDIVIDUELLE ET DE LA METHODE ITERATIVE HYBRIDE AVEC UNE MODELISATION DETAILLEE	98

V.2.1 Utilisation de la méthode PEBS individuelle avec une modélisation détaillée	98
V.2.1.1 Modifications à apporter	98
V.2.1.2 Test de la méthode PEBS individuelle avec une modélisation détaillée	99
V.2.2 Utilisation de la méthode itérative hybride avec une modélisation détaillée	100
V.2.2.1 Modifications à apporter	100
V.2.2.2 Test de la méthode itérative hybride FET avec une modélisation détaillée	101
V.3 ETUDE DE LA STABILITÉ MULTI-OSCILLATION AVEC LA METHODE PEBS INDIVIDUELLE ET LA MÉTHODE ITERATIVE HYBRIDE	103
V.4 FILTRAGE AVEC LA METHODE PEBS INDIVIDUELLE ET LA METHODE ITERATIVE HYBRIDE	104
V.4.1 Introduction	104
V.4.2 Proposition d'un filtrage multi-niveau avec les méthodes PEBS individuelle et itérative hybride	104
V.4.3 Analyse de la fiabilité de la stratégie de filtrage proposée	106
V.5 CONCLUSION	107
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES	109
PERSPECTIVES	110
ANNEXE I : REDUCTION D'UN RESEAU ELECTRIQUE A UN SYSTEME D'UNE MACHINE CONNECTEE A UN NOEUD DE PUISSANCE INFINIE	111
A1.1 LA MODELISATION DU RESEAU	111
A1.2 DECOMPOSITION DU RESEAU EN DEUX MACHINES EQUIVALENTES	111
A1.3 DETERMINATION DU SYSTEME EQUIVALENT D'UNE MACHINE CONNECTEE A UN NOEUD DE PUISSANCE INFINIE	112
ANNEXE II : DECOMPOSITION DU RESEAU EN DEUX GROUPES DE MACHINES DANS LA METHODE EEAC	114
A2.1 LA METHODE CMR	114
A2.2 DETERMINATION DES CONDITIONS INITIALES DE LA METHODE CMR	115
A2.3 LES SERIES DE TAYLOR UTILISÉES PAR LA METHODE EEAC	115

A2.3.1 Les séries de Taylor du type "global" _____	116
A2.3.2 Les séries de Taylor du type "individuel" _____	116
ANNEXE III : LES RESEAUX TESTS _____	117
A3.1 RESEAU NEW-ENGLAND _____	117
A3.2 RESEAU IOWA STATE _____	118
A3.3 RESEAU IEEE20 _____	120
A3.4 RESEAU COLOMBIEN _____	121
BIBLIOGRAPHIE _____	122

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Les réseaux de transports sont aujourd'hui utilisés de plus en plus proche de leur limite de sécurité. Ce phénomène est dû à l'augmentation de la consommation électrique, et à l'optimisation du coût de fonctionnement des réseaux électriques, alors que peu de nouvelles lignes sont mises en service en raison des contraintes écologiques. Cette diminution des marges de sécurité dans le fonctionnement des réseaux se traduit par une vulnérabilité plus importante de ceux-ci face aux incidents potentiels (pertes d'ouvrages, courts-circuits, ...). Comme l'augmentation des transits de puissance va continuer dans les prochaines années avec la déréglementation des marchés de l'électricité, les marges de sécurité des réseaux vont encore diminuer.

Il est, de ce fait, de plus en plus important de rendre l'analyse de la sécurité en temps réel possible, afin d'assurer le bon fonctionnement des réseaux. L'analyse de la sécurité en temps réel peut être définie comme la prévention de toutes pertes de stabilité (transitoire, tension, ...) du réseau lorsqu'un incident se produit. Jusqu'à aujourd'hui, la capacité de calcul des centres de contrôle a limité l'analyse à la sécurité statique. Cela signifie que l'on étudie si le réseau tend pour tous les incidents potentiels vers un point de fonctionnement, mais que l'on ne vérifie pas si le régime transitoire qui conduit à ce point de fonctionnement est correct. L'analyse de la sécurité statique ne suffit donc pas, il faut aussi analyser la sécurité dynamique.

L'analyse de la sécurité dynamique en temps réel est beaucoup plus complexe que l'analyse de la sécurité statique car il ne s'agit plus de calculer des points de fonctionnement, mais de calculer des régimes transitoires, ce qui nécessite un volume de calcul très important. La méthode la plus fiable et la plus précise pour calculer ces régimes transitoires est l'intégration numérique des équations différentielles qui décrivent le comportement du réseau. Cependant, cette méthode nécessite trop de calculs pour pouvoir en quelques minutes analyser la stabilité transitoire pour plusieurs centaines de défauts.

Pour remplir cette tâche considérable, il est nécessaire d'utiliser une phase de filtrage qui a pour objectif d'éliminer très rapidement les défauts qui ne posent pas de problèmes de stabilité, les autres défauts faisant ensuite l'objet d'une étude plus détaillée. On gagne ainsi énormément de temps. Néanmoins, pour réaliser ce filtrage, il faut une méthode qui soit très fiable afin de ne pas mettre en danger la stabilité du réseau, et qui soit aussi très rapide pour rendre l'analyse de la sécurité dynamique réalisable en temps réel. Jusqu'à aujourd'hui, aucune méthode réunissant ces deux caractéristiques n'a pu être trouvée, ce qui fait que l'analyse de la sécurité dynamique n'est toujours pas possible en temps réel à l'heure actuelle. Pour garantir la sécurité des réseaux, les opérateurs sont donc obligés d'utiliser des études réalisées à l'avance. Cette manière

de conduire les réseaux n'est pas très souple, et oblige à prendre de grandes marges de sécurité; Ce qui implique une utilisation moins efficace des réseaux, avec un coût de fonctionnement plus élevé et des transits de puissance maximaux plus faibles que ceux réellement admissibles. Dans le contexte actuel, il est donc important de pouvoir analyser en temps réel la sécurité dynamique des réseaux.

Les travaux réalisés dans le cadre de cette thèse ont porté sur le filtrage des défauts potentiels dans l'analyse de la sécurité dynamique. Nous nous sommes attachés à mettre au point une stratégie de filtrage fiable et rapide.

Nous commencerons dans le chapitre I par rappeler les différentes méthodes d'analyses de la stabilité transitoire existantes. Nous ferons à la fin de ce chapitre une première sélection des méthodes intéressantes pour le filtrage des contingences (défauts potentiels).

Nous testerons ensuite dans le chapitre II ces méthodes à l'aide de quatre réseaux tests. Cela nous permettra de faire un choix définitif sur les méthodes à étudier pour réaliser un filtrage efficace.

Nous développerons ces méthodes dans les chapitres III et IV ces méthodes. Nous leur apporterons des modifications susceptibles d'améliorer leur fiabilité et leur rapidité.

Enfin, nous proposerons dans le chapitre V une procédure de filtrage basée sur les méthodes développées dans les chapitres III et IV. Nous étudierons aussi l'influence de la modélisation sur la précision des résultats, et nous modifierons en conséquence les méthodes proposées dans les chapitres III et IV.

CHAPITRE I

ANALYSE DE LA SECURITE DYNAMIQUE EN TEMPS REEL

CHAPITRE I

ANALYSE DE LA SECURITE DYNAMIQUE EN TEMPS REEL

I.1 INTRODUCTION

La sécurité dynamique a été définie par le " North American Electric Reliability Council" comme la prévention de panne en cascade lorsque le réseau de transport est soumis à des perturbations sévères. Pour éviter que ces pannes ne se produisent, le réseau est planifié et conduit de manière à ce que les deux conditions suivantes soient respectées :

- Lorsqu'un défaut apparaît, le régime permanent qui suit la perturbation doit être acceptable. Aucun élément du réseau ne doit être surchargé, et les tensions aux différents noeuds doivent être dans les limites autorisées.
- Le réseau ne doit pas perdre la stabilité pendant le régime transitoire engendré par la perturbation.

La première condition relève de l'analyse de la stabilité statique, et ne concerne que le nouveau régime permanent. La deuxième condition nécessite une analyse de la stabilité transitoire pour vérifier qu'aucun générateur ne perd la stabilité. C'est à ce dernier type de stabilité que l'on va s'intéresser dans ce rapport de thèse.

I.2 L'ANALYSE DE LA SECURITE DYNAMIQUE EN TEMPS REEL

I.2.1 Présentation

L'Analyse de la Sécurité Dynamique (ASD) s'intéresse à la période transitoire qui suit l'élimination de la perturbation. Elle vérifie que le réseau évolue vers des conditions de fonctionnement acceptables (pas de perte de synchronisme de certains générateurs). Les grandeurs surveillées sont donc essentiellement les angles rotoriques des machines afin de s'assurer qu'aucune machine ne perd le synchronisme.

La figure I.1 illustre le comportement d'une machine synchrone suite à une perturbation dans le réseau. Elle montre la réponse de cette machine pour trois cas de figure différents. Dans le premier cas, la machine reste stable. L'oscillation de l'angle rotorique diminue progressivement jusqu'à atteindre le régime permanent. Dans le deuxième cas, l'angle rotorique croît régulièrement jusqu'à la perte de synchronisme. Cette forme d'instabilité est appelée "instabilité sur la première oscillation". Enfin, dans le troisième cas, la machine reste stable sur les deux premières oscillations avant de perdre la stabilité sur la troisième. Ce type d'instabilité est appelé "instabilité multi-oscillation".

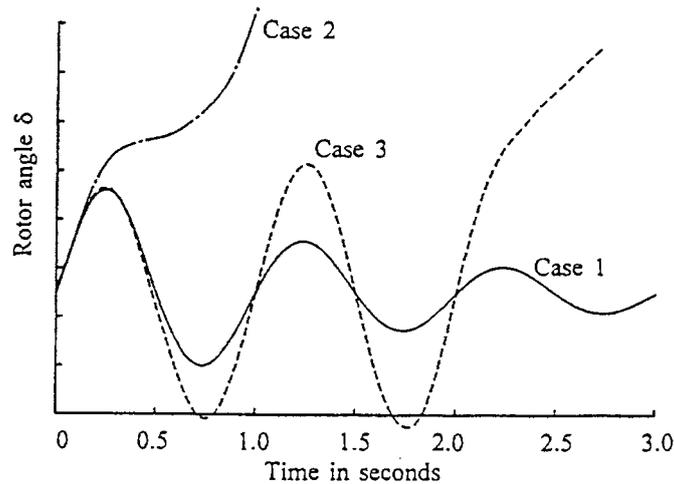


Figure I-1 : Réponses d'un générateur à une perturbation [KUN-94]

Jusqu'à aujourd'hui, la capacité de calcul des centres de contrôle a limité l'analyse de la sécurité à l'étude de la stabilité statique. Les méthodes d'analyse de la stabilité transitoire demandent trop de calculs pour que l'ASD soit applicable en temps réel. Ceci signifie que seules les conditions de fonctionnement correspondant au nouveau régime permanent sont calculées, et que seules les limites à ne pas dépasser pour les tensions et les transits de puissance sont vérifiées. Le régime transitoire est donc ignoré, et l'on ne sait donc pas si le nouveau régime permanent est véritablement atteint, ce qui est le cas seulement si le réseau ne perd pas la stabilité pendant le régime transitoire. L'ASD est donc nécessaire car l'analyse de la sécurité statique ne suffit pas à assurer que le fonctionnement du réseau sera correct après une perturbation. Le fait, que l'ASD ne soit pas réalisable en temps réel, constitue un gros problème pour la conduite des réseaux à l'heure actuelle. Les exploitants sont obligés de faire fonctionner leur réseau avec de grandes marges de sécurité, en s'aidant de simulations effectuées à l'avance et de l'expérience de leurs opérateurs. Les réseaux ne sont, de ce fait, pas utilisés de façon optimum, ce qui pénalise leur coût de fonctionnement. Mais surtout, la sécurité dynamique des réseaux risque d'être mise en péril dans un proche avenir à cause de l'augmentation de leur niveau de charge liée à la déréglementation du marché et à l'absence de construction de nouvelles lignes.

Les perturbations, prises en compte dans l'ASD, sont généralement des courts-circuits triphasés entre les phases et la terre. On peut aussi prendre en compte des pertes d'ouvrages (lignes, générateurs, transformateurs, ...), mais ces derniers entraînent des régimes transitoires beaucoup moins contraignants que les courts-circuits. Ils posent surtout des problèmes de stabilité statique. Les contingences (défauts potentiels) étudiées dans nos travaux ont donc été seulement des courts-circuits triphasés se produisant à différents points du réseau (lignes de transport, noeuds, ...).

Lorsqu'un court-circuit se produit, il est éliminé grâce à l'action des dispositifs de protections qui l'isolent. S'il est fugitif, l'élément sur lequel il s'est produit est remis en service et le réseau retrouve sa configuration initiale. S'il est permanent, l'élément est éliminé et le réseau change de configuration.

I.2.2 Organisation d'un module d'ASD

Un module d'ASD peut se décomposer en quatre grandes parties, comme le montre la figure I.2.

- La première étape sélectionne les contingences pertinentes dont l'influence doit être étudiée parmi l'ensemble des contingences possibles. Toutes les contingences ne peuvent pas être prises en compte car leur nombre est considérable, il faut donc effectuer un premier tri pour ne retenir que celles qui sont les plus dangereuses. Pour cela, on peut utiliser l'expérience des opérateurs, et des techniques comme les systèmes experts.
- La deuxième étape analyse rapidement la stabilité des contingences sélectionnées dans l'étape précédente. Cette étape est une étape de filtrage qui a pour objectif d'éliminer les contingences très stables. Cela évite qu'elle fasse l'objet d'une étude détaillée inutile. On gagne ainsi beaucoup de temps. C'est cette partie qui permet de rendre possible l'ASD en temps réel. En effet, la plupart des contingences sont très stables si le réseau est dans un fonctionnement normal. On peut donc économiser beaucoup de temps si on les élimine rapidement. Cette étape fait appel à des méthodes utilisant des hypothèses simplificatrices, afin que l'analyse de la stabilité soit très rapide. Les contingences, qui sont trouvées instables, sont ensuite rangées dans une liste où elles sont classées par ordre de sévérité. Celles qui sont estimées les plus instables feront l'objet d'une étude détaillée en priorité dans l'étape suivante. Pour pouvoir classer ces défauts par ordre de sévérité, il faut une mesure du degré de stabilité. Généralement, on utilise le Temps d'Elimination Critique (TEC). C'est par définition la durée limite de la perturbation au-delà de laquelle le réseau est instable. Evidemment, cette mesure n'a de sens que pour les courts-circuits. Cependant, il donne une bonne idée du degré de stabilité d'un réseau. Comme c'est ce type de perturbations que nous avons étudié dans nos travaux de recherche, nous avons adopté cet indice de stabilité.
- La troisième étape effectue une étude approfondie pour les contingences qui ont été trouvées instables dans l'étape précédente.
- La quatrième étape détermine les actions préventives à mettre en oeuvre pour sécuriser le réseau. C'est-à-dire les modifications à apporter dans le fonctionnement du réseau, pour que celui-ci demeure stable quel que soit le défaut qui se produit. Si aucune action préventive n'existe pour une contingence donnée, ou si elles ne sont pas suffisantes ou si elles entraînent un coût de fonctionnement trop élevé, des actions correctives sont

recherchées. Ces actions seront appliquées lors de l'apparition du défaut afin que le réseau reste stable.

Nos travaux ont concerné la partie filtrage. Cette partie a une grande importance dans la mise en oeuvre d'un module d'ASD en temps réel, car elle permet d'économiser beaucoup de temps. A l'heure actuelle, le filtrage efficace des contingences n'est pas encore possible car il n'existe pas de méthodes assez rapides et fiables pour remplir cette tâche. Il constitue donc une grande priorité.

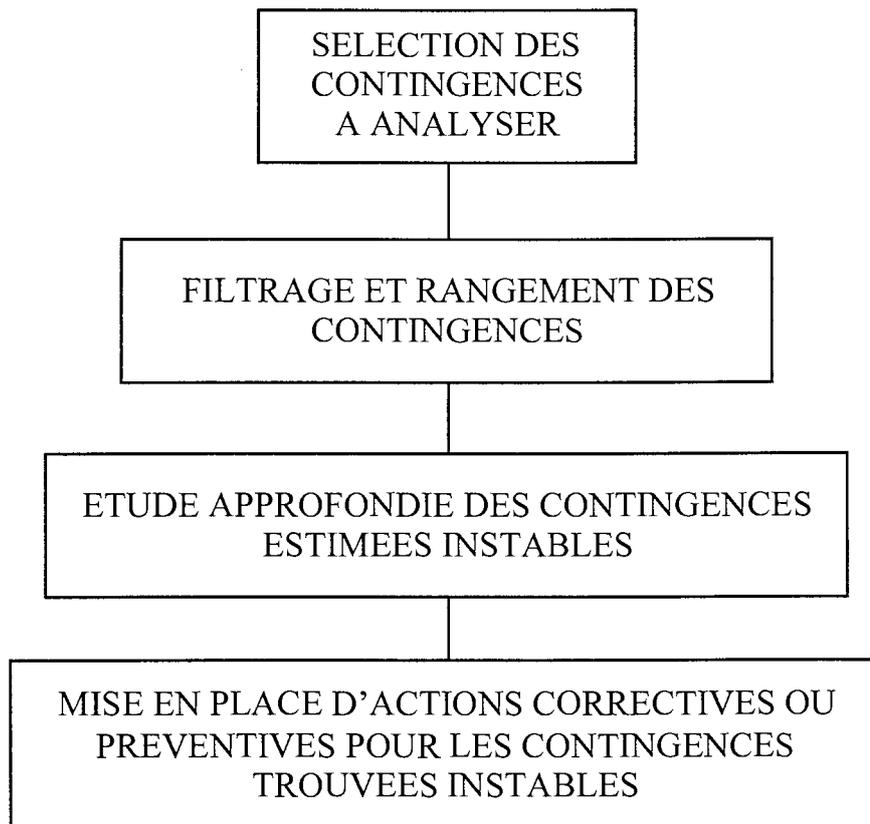


Figure I-2 : Organigramme d'un module d'ASD

I.3 LES METHODES D'ANALYSE DE LA STABILITE TRANSITOIRE

Après avoir défini ce qu'est l'analyse de la sécurité dynamique, nous allons présenter ici les principales méthodes d'analyse de la stabilité transitoire. Une critique accompagnera la présentation de chaque méthode, afin de sélectionner les plus intéressantes pour le filtrage.

Depuis trente ans, beaucoup de méthodes ont été proposées pour traiter la stabilité transitoire en temps réel. Elles peuvent être classées en quatre groupes :

- Les méthodes à base de simulation numérique.
- Les méthodes de reconnaissance de forme.

- Les méthodes directes.
- Les méthodes hybrides qui combinent la simulation numérique avec une méthode directe ou avec une méthode de reconnaissance de forme.

1.3.1 La simulation numérique

La simulation numérique est la méthode traditionnelle utilisée pour analyser la stabilité transitoire. Elle consiste à intégrer les équations différentielles non linéaires qui régissent le comportement du réseau, afin de prévoir l'évolution des angles rotoriques des machines. Cette méthode est la plus fiable et elle donne des résultats très précis si on utilise des modèles détaillés. Cependant, elle est lente puisque le TEC est recherché à l'aide d'une procédure itérative, utilisant la méthode dichotomique par exemple. Le nombre de simulations à réaliser est donc important.

De nombreux travaux de recherche sont effectués à l'heure actuelle pour accélérer cette méthode. Il porte pour la plupart sur la parallélisation des calculs. Malgré des progrès certains, cette méthode est encore trop lente pour pouvoir être utilisée en temps réel.

1.3.2 Les méthodes d'intelligence artificielle

Les méthodes de reconnaissance de forme ont été beaucoup étudiées, dans l'objectif de les utiliser pour le filtrage des contingences. Cet engouement s'explique par le fait que ces méthodes peuvent fournir une analyse de la stabilité dans des délais très brefs.

Dans les méthodes de reconnaissance de forme, on crée un vecteur de forme dont les composantes contiennent suffisamment d'information à propos de la stabilité transitoire pour qu'un classificateur puisse fournir un indice de stabilité à partir de ce vecteur de forme. Pour que le classificateur puisse fournir cet indice, il est nécessaire d'effectuer une phase d'apprentissage. Cet apprentissage est réalisé à partir de données fournies par des simulations numériques.

Les classificateurs les plus répandus à l'heure actuelle et sans aucun doute les plus performants sont les réseaux de neurones. Ils permettent de donner une bonne estimation du TEC grâce à leur capacité à trouver des fonctions complexes. Le TEC est en effet une fonction complexe du point de fonctionnement et des topologies avant et après défaut du réseau, ainsi que du type, de la durée et de la localisation du défaut. La puissance des réseaux de neurones peut donc être utilisée pour estimer cette fonction.

Différents types de réseaux de neurones existent. Le plus répandu est le perceptron utilisant un algorithme à rétropropagation de l'erreur pour l'apprentissage [SOB-89]. Ce type de réseaux de neurones est composé d'une ou plusieurs couches intermédiaires. Chaque couche est constituée d'un ou plusieurs neurones, auxquels sont associés une fonction analytique pour leur activation. En entrée du réseau, on met des variables pertinentes pour la détermination du

TEC (puissances électriques fournies par les générateurs, ...). En sortie, le réseau fournit le TEC de la contingence étudiée. Un exemple de ce type de réseaux de neurones est donné dans la figure I-3.

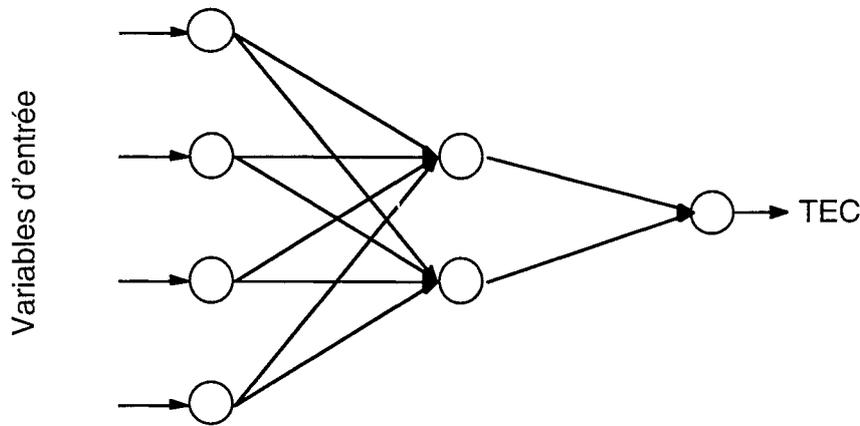


Figure I-3 : Réseau de neurones à une couche intermédiaire

Pour entraîner ce type de réseaux, on utilise un algorithme à rétropropagation de l'erreur qui permet de modifier le poids des connexions et les paramètres des fonctions analytiques d'activation jusqu'à ce que la sortie du réseau soit correcte. Cette phase d'apprentissage est réalisée à partir de simulations effectuées en différé.

Une fois que l'apprentissage du réseau de neurones est effectué. Ceux-ci sont capables d'estimer très rapidement le TEC d'un défaut puisque très peu de calculs sont nécessaires. Cette capacité les rend très attractifs pour l'ASD en temps réel. De plus, ils ont une précision proche de celle de la simulation numérique et ils ne sont pas limités en ce qui concerne la modélisation. Ils représentent donc une solution idéale pour le filtrage des défauts en temps réel. Ils ont d'ailleurs fait naître beaucoup d'espoir au début des années 90.

Malheureusement, la nature combinatoire des réseaux électriques a pour conséquence un nombre très important de points de fonctionnement possibles pour un réseau de taille réelle. Généralement, il est assez facile d'entraîner un réseau de neurones pour différents points de fonctionnement, une topologie et un défaut donné, bien que pour un grand réseau cela nécessite beaucoup de simulations. Mais, lorsque la topologie ou le défaut change, le réseau de neurones ne fournit plus de bons résultats dans la plupart des cas. Il faut reprendre l'apprentissage avec de nouvelles simulations numériques obtenues avec la nouvelle topologie et le nouveau défaut. Le nombre de défauts et de topologies potentiels étant très importants sur un réseau réel, il faut effectuer énormément de simulations numériques pour que le réseau de neurones fournissent de bons résultats quel que soit le point de fonctionnement. Cet apprentissage peut nécessiter plusieurs mois de simulations. Pour cette raison, les réseaux de neurones ne sont pas pour l'instant applicables à l'ASD en temps réel.

De plus, une étude menée en 1994 [HOB-94] a montré qu'ils ne pouvaient pas résoudre le problème de l'ASD en temps réel. En effet, les conclusions de l'étude étaient qu'une fonction liant le TEC aux paramètres du réseau électrique (point de fonctionnement, topologie, ...) pourrait ne pas exister à cause des nombreuses discontinuités existantes. Les tests effectués lors de cette étude ont montré que l'apprentissage du réseau de neurones était à refaire à chaque fois que la topologie ou que le défaut changeait. Les essais que nous avons effectués sur les réseaux de neurones nous ont permis de tirer les mêmes conclusions [MAG-96].

1.3.3 Les méthodes directes

Les méthodes directes, qui utilisent principalement la fonction d'énergie transitoire, ont fait l'objet de beaucoup d'investigations depuis une trentaine d'années. L'objectif de ces méthodes est d'accélérer l'analyse de la stabilité transitoire en supprimant ou en réduisant la simulation numérique.

1.3.3.1 Les méthodes basées sur la fonction d'énergie transitoire

Les méthodes basées sur la Fonction d'Energie Transitoire (FET) ont pour objectif de déterminer la stabilité du réseau, en réalisant un minimum de simulations numériques.

La FET est un cas particulier de la seconde méthode ou de la méthode directe de Lyapunov. Les bases théoriques de cette méthode ont été posées par A.M.Lyapunov en 1892. L'application de cette méthode, à l'étude de la stabilité transitoire des réseaux électriques, a commencé à la fin des années 40 avec Magnusson. Depuis, beaucoup de recherches ont été effectuées, surtout ces 30 dernières années.

a) Principe

Le principe des méthodes FET est de déterminer si le réseau est stable en comparant deux grandeurs qui sont :

- L'énergie transitoire totale présente dans le réseau au moment où le défaut est éliminé.
- L'énergie critique qui est l'énergie potentielle maximum que peut contenir le réseau.

Cette comparaison fournit aussi une mesure quantitative du degré de stabilité du réseau.

Illustration de la FET

Pour illustrer la FET, on peut prendre l'exemple d'une bille roulant à l'intérieur d'une cuvette (voir figure I-4).

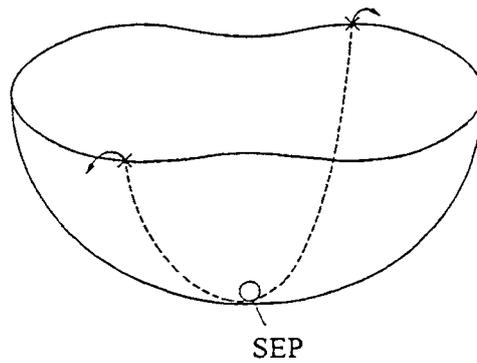


Figure I-4 : Illustration de la méthode FET [KUN-94]

Dans cette illustration, la bille représente l'état du système à un instant donné, la cuvette représente la valeur de l'énergie potentielle du système en fonction des variables d'état. La zone à l'intérieur de la cuvette est la région de stabilité, et la zone à l'extérieur est la région d'instabilité. Le bord de la cuvette est la limite de stabilité du système.

En régime permanent, la bille se situe au fond de la cuvette. Ce point est nommé le Point d'Equilibre Stable (PES). Il est noté SEP sur la figure I-4. Lorsqu'une perturbation apparaît, une certaine quantité d'énergie cinétique est fournie à la bille qui se déplace alors dans une direction donnée. Lorsque la perturbation cesse, cette énergie se transforme en énergie potentielle. Si elle est transformée entièrement avant que la bille atteigne la limite de stabilité, la bille fait demi-tour et retourne vers le PES post-défaut. Si ce n'est pas le cas, la bille sort du domaine de stabilité.

On peut remarquer que la stabilité du système peut être déterminée en connaissant l'énergie cinétique injectée lors de la perturbation et l'énergie critique du système, c'est-à-dire la hauteur de la cuvette. Comme le bord de la cuvette est à une hauteur variable, l'énergie critique dépend donc de la direction de la trajectoire de la bille.

On peut tout à fait adapter ce concept au réseau électrique.

En régime permanent, le réseau se trouve au PES. Lorsqu'un défaut apparaît, l'équilibre est rompu et les machines synchrones se mettent alors à accélérer ou à décélérer. Le réseau quitte donc le PES.

Après l'élimination du défaut, l'énergie cinétique emmagasinée par les générateurs pendant la durée du défaut est convertie progressivement en énergie potentielle. Le réseau reste stable si toute l'énergie cinétique est convertie avant d'atteindre la limite du domaine de stabilité. La stabilité du réseau peut donc être déterminée si on connaît l'énergie totale injectée dans le réseau pendant le défaut, et l'énergie potentielle maximum que celui-ci peut contenir pour le défaut en question.

L'analyse de la stabilité transitoire avec les méthodes FET se décompose donc en deux étapes:

- Définir si le système est stable. Pour cela, il faut comparer la valeur de l'énergie transitoire totale (énergie potentielle + énergie cinétique), présente dans le réseau au moment où le défaut est éliminé, avec l'énergie critique qui est l'énergie potentielle maximum qui peut être contenue dans le réseau. On compare l'énergie critique avec l'énergie totale du réseau, et non pas avec l'énergie cinétique seulement, car l'énergie potentielle évolue pendant l'application du court-circuit. Pour connaître la valeur de l'énergie transitoire présente dans le réseau au moment de l'élimination du défaut, une simulation numérique est réalisée pendant la période de défaut. Ceci est la seule simulation temporelle à réaliser en théorie avec les méthodes FET, si on considère que l'énergie critique peut être calculée sans simulations supplémentaires.
- Calcul d'un indice de stabilité qui est égal à la différence entre l'énergie critique et l'énergie totale présente à l'élimination du défaut. Cet indice est connu sous le nom de marge d'énergie transitoire. S'il est positif, le système est stable. S'il est négatif, le système est instable. Sa valeur représente le degré de stabilité ou d'instabilité du réseau.

Un autre indice de stabilité peut être utilisé avec la FET. Il s'agit du Temps d'Elimination Critique du défaut (TEC). Il correspond à la durée du défaut pour laquelle la marge d'énergie transitoire est nulle. Cet indice est plus précis que la marge d'énergie transitoire, car dans la stabilité transitoire, c'est le temps de réaction des protections qui est important. Il permet d'avoir une mesure directe de la marge de temps dont on dispose pour chaque défaut. On obtient ainsi une meilleure mesure de la stabilité.

Algorithme de calcul du TEC

Pour calculer le TEC avec les méthodes FET, il est nécessaire de connaître l'énergie critique et l'évolution, lorsque le défaut est appliqué, de l'énergie totale présente dans le réseau. En effet, le TEC correspond à la durée du défaut pour laquelle l'énergie totale présente dans le réseau devient égale à l'énergie critique. La procédure de calcul du TEC est donc la suivante :

- Calcul de l'énergie critique.
- Simulation de la trajectoire de défaut jusqu'à ce que l'énergie totale présente dans le réseau devienne égale à l'énergie critique. L'énergie totale est calculée avec la configuration post-défaut.
- Le TEC est égal au temps où l'énergie totale du système est égale à l'énergie critique.

On remarque que pour mettre en oeuvre les méthodes FET, il faut, dans un premier temps, trouver une fonction d'énergie transitoire pour le réseau. Ensuite, il faut estimer l'énergie critique. Ces deux points sont traités ci-dessous après une présentation de la modélisation classique.

b) La modélisation classique

Avant de déterminer l'expression de la FET, nous allons présenter la modélisation classique. Cette modélisation est couramment utilisée en stabilité transitoire. Elle permet de simuler rapidement le comportement du réseau grâce à sa simplicité. Beaucoup de nos essais ont été réalisés avec cette modélisation.

Un réseau est représenté par une série d'équations différentielles et algébriques qui décrivent le comportement des différents éléments (générateurs, charges, ...). A partir de ces équations, on peut calculer l'évolution des différentes grandeurs pendant le régime transitoire. Il suffit d'intégrer les équations différentielles avec une méthode d'intégration numérique. Plus la modélisation est détaillée, plus les équations décrivant le réseau sont nombreuses.

Avant de présenter la modélisation classique, nous allons définir l'angle de référence utilisé pour étudier la stabilité transitoire dans nos travaux.

Le centre d'inertie angulaire

Pour pouvoir déterminer la stabilité d'un réseau, les angles doivent être calculés par rapport à un angle de référence. Cet angle peut être celui d'un générateur, mais en général, on utilise le Centre d'Inertie Angulaire (CIA) dans les études de stabilité transitoire. Il correspond au centre d'inertie des angles rotoriques. Il permet d'obtenir des expressions plus symétriques et plus compactes pour les équations différentielles du réseau. Ces dernières sont ainsi plus faciles à manipuler. C'est donc cette référence que nous avons adoptée dans nos travaux de recherche.

Le CIA d'un réseau composé de n machines est défini par les équations suivantes :

$$\begin{aligned}\delta_{CI} &= \frac{1}{M_T} \sum_{i=1}^n M_i \delta_i \\ \dot{\delta}_{CI} &= \omega_{CI} = \frac{1}{M_T} \sum_{i=1}^n M_i \dot{\delta}_i\end{aligned}\quad (I-1)$$

Avec : δ_{CI} : angle rotorique du CIA.

ω_{CI} : vitesse rotor du CIA.

δ_i : angle rotorique du générateur i.

ω_i : vitesse rotor du générateur i.

M_i : moment d'inertie du générateur i.

$$M_T = \sum_{i=1}^n M_i$$

Le mouvement du CIA est décrit par l'équation I-2 :

$$M_T \ddot{\delta}_{CI} = M_T \dot{\omega}_{CI} = \sum_{i=1}^n M_i \ddot{\delta}_i = \sum_{i=1}^n (P_{mi} - P_{ei}) \quad (I-2)$$

Avec P_{mi} qui est la puissance mécanique fournie au générateur i, et P_{ei} qui est la puissance électrique en sortie du générateur i.

Dans le cadre de référence du CIA, les angles et les vitesses rotors sont égaux à :

$$\begin{aligned}\tilde{\delta}_i &= \delta_i - \delta_{CI} \\ \tilde{\omega}_i &= \omega_i - \omega_{CI} \quad (i=1,2,\dots,n)\end{aligned}\quad (I-3)$$

Le modèle classique

C'est le modèle le plus simple qui existe. Les hypothèses simplificatrices effectuées dans ce modèle sont les suivantes :

- la puissance mécanique des générateurs est constante.
- l'amortissement des machines est négligé.
- le générateur est représenté par une F.E.M. constante derrière la réactance transitoire d'axe direct. L'angle rotorique d'un générateur synchrone est alors égal à la phase de la FEM d'amplitude constante.
- les dispositifs de réglage et de contrôle ne sont pas pris en compte.
- Les charges sont considérées comme des impédances constantes. Cela permet de réduire la matrice d'admittance nodale (Ybus) aux nœuds internes des générateurs. Les réactances des générateurs et les charges sont alors incluses dans cette matrice. La taille de cette matrice est ainsi fortement réduite. Cette réduction de la matrice Ybus permet une nette accélération de la simulation numérique puisqu'il n'y a plus besoin de rechercher l'état d'équilibre du réseau de transmission à chaque pas d'intégration.

Les équations d'état du réseau avec la modélisation classique

Avec ce modèle, le vecteur des courants générateurs [I] est donné par l'équation suivante :

$$[I] = [Y_{bus}].[E] \quad (I-4)$$

[Ybus] est la matrice d'admittance nodale réduite, et [E] correspond à la valeur des FEM constantes dans le modèle des générateurs.

La puissance électrique fournie, par la machine i, au réseau de transmission est alors égale à :

$$\begin{aligned}P_{ei} &= \operatorname{Re}(E_i I_i^*) \quad i = 1, 2, \dots, n \\ P_{ei} &= \sum_{j=1}^n E_i E_j Y_{ij} \cos((\delta_i - \delta_j) - \theta_{ij}) \\ P_{ei} &= E_i G_{ii} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n E_i E_j [B_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) + G_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j)]\end{aligned}\quad (I-5)$$

Avec $Y_{ij} \angle \theta_{ij}$ (ou $G_{ij} + jB_{ij}$) qui est l'élément ij de la matrice d'admittance réduite (Ybus).

Pour décrire le comportement des rotors des machines synchrones, on utilise l'équation de mouvement suivante :

$$M_i \ddot{\delta}_i = P_{mi} - P_{ei} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (\text{I-6})$$

Dans cette équation, l'amortissement est négligé et P_{ei} est obtenu à l'aide de l'équation (I-5).

Dans la référence du CIA, l'équation (I-6) devient :

$$M_i \ddot{\tilde{\delta}}_i = P_{mi} - P_{ei} - \frac{M_i}{M_T} P_{ci} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (\text{I-7})$$

$$\text{Avec } P_{ci} = \sum_{i=1}^n P_{mi} - P_{ei}$$

Les équations d'état du réseau dans la référence du CIA sont alors égales à :

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{\delta}}_i &= \tilde{\omega}_i \\ M_i \dot{\tilde{\omega}}_i &= P_{mi} - P_{ei} - \frac{M_i}{M_T} P_{ci} \quad i = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (\text{I-8})$$

$$\text{Avec } P_{ei} = E_i^2 G_{ii} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n E_i E_j \left[B_{ij} \sin(\tilde{\delta}_i - \tilde{\delta}_j) + G_{ij} \cos(\tilde{\delta}_i - \tilde{\delta}_j) \right].$$

On peut remarquer que ce modèle n'utilise que deux variables d'état $(\tilde{\delta}_i, \tilde{\omega}_i)$ par générateur. Ce qui est très peu par rapport à une modélisation complète où il y a généralement 6 variables d'état par générateur. De plus, une modélisation complète comprend aussi d'autres variables d'état correspondant aux autres éléments du réseau (régulations, ...) et la matrice Y_{bus} ne peut pas être réduite aux nœuds internes des générateurs. La simulation numérique est donc beaucoup plus rapide avec la modélisation classique. Malheureusement, les résultats peuvent être aussi imprécis (voir chapitre V) car cette modélisation est très simplifiée.

c) Détermination de la fonction d'énergie transitoire

La détermination de la FET est effectuée ci-dessous en utilisant la modélisation classique définie ci-dessus. La FET est obtenue à partir des équations dynamiques du réseau. L'intégrale première de l'équation de mouvement constitue une bonne fonction d'énergie transitoire [PAI-89]. Rappelons que l'équation de mouvement d'une machine dans le cadre de référence du centre d'inertie angulaire est égale à :

$$M_i \dot{\tilde{\omega}}_i = P_{mi} - P_{ei} - \frac{M_i}{M_T} P_{ci} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (\text{I-9})$$

A partir de cette expression, nous calculons la FET pour une machine :

$$V_i(\tilde{\delta}_i, \tilde{\omega}_i) = \int_{\tilde{\delta}_i^s}^{\tilde{\delta}_i} (M_i \dot{\tilde{\omega}}_i - P_{mi} + P_{ei} + \frac{M_i}{M_T} P_{ci}) d\tilde{\delta}_i \quad (I-10)$$

$$V_i(\tilde{\delta}_i, \tilde{\omega}_i) = \frac{1}{2} M_i \tilde{\omega}_i^2 - \int_{\tilde{\delta}_i^s}^{\tilde{\delta}_i} (P_{mi} - P_{ei} - \frac{M_i}{M_T} P_{ci}) d\tilde{\delta}_i \quad i = 1, 2, \dots, n$$

V_i est la valeur de la FET de la machine i par rapport au point d'équilibre stable post-défaut $(\tilde{\delta}_i^s, \tilde{\omega}_i^s)$. Cette fonction est aussi appelée FET individuelle.

Pour obtenir la FET totale du réseau, il faut additionner toutes les FET individuelles. Ce qui nous donne :

$$V(\tilde{\delta}, \tilde{\omega}) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n M_i \tilde{\omega}_i^2 - \sum_{i=1}^n \int_{\tilde{\delta}_i^s}^{\tilde{\delta}_i} (P_{mi} - P_{ei} - \frac{M_i}{M_T} P_{ci}) d\tilde{\delta}_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (I-11)$$

Si on remplace la puissance électrique par son expression (I-5), on obtient :

$$V(\tilde{\delta}, \tilde{\omega}) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n M_i \tilde{\omega}_i^2 - \sum_{i=1}^n P_i(\tilde{\delta}_i - \tilde{\delta}_i^s) + \sum_{i=1}^n \int_{\tilde{\delta}_i^s}^{\tilde{\delta}_i} \left[\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n E_i E_j \left[B_{ij} \sin(\tilde{\delta}_i - \tilde{\delta}_j) + G_{ij} \cos(\tilde{\delta}_i - \tilde{\delta}_j) \right] \right] d\tilde{\delta}_i \quad (I-12)$$

$$+ \sum_{i=1}^n \int_{\tilde{\delta}_i^s}^{\tilde{\delta}_i} \frac{M_i}{M_T} P_{ci} d\tilde{\delta}_i$$

Avec $P_i = P_{mi} - E_i^2 G_{ii}$

En tenant compte du fait que :

- $\sum_{i=1}^n \int_{\tilde{\delta}_i^s}^{\tilde{\delta}_i} \frac{M_i}{M_T} P_{ci} d\tilde{\delta}_i = P_{ci} \sum_{i=1}^n \frac{M_i}{M_T} \tilde{\delta}_i = 0$
- $B_{ij} = B_{ji}$ et $G_{ij} = G_{ji} \quad \forall i, j = 1, 2, \dots, n$

L'expression $\sum_{i=1}^n \int_{\tilde{\delta}_i^s}^{\tilde{\delta}_i} \left[\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n E_i E_j \left[B_{ij} \sin(\tilde{\delta}_i - \tilde{\delta}_j) + G_{ij} \cos(\tilde{\delta}_i - \tilde{\delta}_j) \right] \right] d\tilde{\delta}_i$ devient :

$$\sum_{i=1}^{n-1} \int_{\tilde{\delta}_{ij}^s}^{\tilde{\delta}_{ij}} \left[\sum_{j=i+1}^n E_i E_j B_{ij} \sin(\tilde{\delta}_{ij}) \right] d(\tilde{\delta}_{ij}) + \sum_{i=1}^{n-1} \int_{\tilde{\delta}_i^s + \tilde{\delta}_j^s}^{\tilde{\delta}_i + \tilde{\delta}_j} \left[\sum_{j=i+1}^n E_i E_j G_{ij} \cos(\tilde{\delta}_{ij}) \right] d(\tilde{\delta}_i + \tilde{\delta}_j)$$

(I-13)

Ceci donne :

$$V(\tilde{\delta}, \tilde{\omega}) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n M_i \tilde{\omega}_i^2 - \sum_{i=1}^n P_i (\tilde{\delta}_i - \tilde{\delta}_i^s) - \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n E_i E_j \left[B_{ij} (\cos \tilde{\delta}_{ij} - \cos \tilde{\delta}_{ij}^s) - \int_{\tilde{\delta}_i^s + \tilde{\delta}_j^s}^{\tilde{\delta}_i + \tilde{\delta}_j} G_{ij} \cos \tilde{\delta}_{ij} d(\tilde{\delta}_i + \tilde{\delta}_j) \right] \quad (\text{I-14})$$

V est la valeur de la fonction d'énergie transitoire au point $(\tilde{\delta}, \tilde{\omega})$ par rapport au point d'équilibre stable post-défaut $(\tilde{\delta}^s, \tilde{\omega}^s)$.

Interprétations physiques des différentes composantes de la FET

En regardant l'équation (I-14), on remarque que la FET peut se décomposer en deux parties. Une partie qui est fonction de $\tilde{\omega}$ et qui représente l'énergie cinétique, et une autre partie qui est fonction de $\tilde{\delta}$ et qui représente l'énergie potentielle. L'énergie cinétique est donc égale à :

$$Eci(\tilde{\omega}) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n M_i \tilde{\omega}_i^2 \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (\text{I-15})$$

et l'énergie potentielle est égale à :

$$Epe(\tilde{\delta}) = \sum_{i=1}^n P_i (\tilde{\delta}_i - \tilde{\delta}_i^s) - \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n E_i E_j \left[B_{ij} (\cos \tilde{\delta}_{ij} - \cos \tilde{\delta}_{ij}^s) - \int_{\tilde{\delta}_i^s + \tilde{\delta}_j^s}^{\tilde{\delta}_i + \tilde{\delta}_j} G_{ij} \cos \tilde{\delta}_{ij} d(\tilde{\delta}_i + \tilde{\delta}_j) \right] \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (\text{I-16})$$

L'énergie potentielle peut encore se décomposer en plusieurs composantes dont les interprétations physiques sont les suivantes :

- $\sum_{i=1}^n P_i (\tilde{\delta}_i - \tilde{\delta}_i^s)$ représente la variation de l'énergie de position des rotors.
- $\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n E_i E_j B_{ij} (\cos \tilde{\delta}_{ij} - \cos \tilde{\delta}_{ij}^s)$ représente la variation de l'énergie magnétique stockée dans les branches du réseau.
- $\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n E_i E_j G_{ij} \int_{\tilde{\delta}_i^s + \tilde{\delta}_j^s}^{\tilde{\delta}_i + \tilde{\delta}_j} \cos \tilde{\delta}_{ij} d(\tilde{\delta}_i + \tilde{\delta}_j)$ représente la variation de l'énergie de dissipation dans les branches du réseau.

Toutes ces variations d'énergie sont définies par rapport au point d'équilibre stable post-défaut. On remarque que le dernier terme est dépendant de la trajectoire du système. En effet, il est nécessaire de connaître celle-ci pour pouvoir effectuer l'intégration. Malheureusement, dans les méthodes FET, on ne connaît pas la trajectoire du système après l'élimination du défaut. Il est donc nécessaire de négliger les conductances de transfert (G_{ij}), ou d'estimer la trajectoire post-défaut du système, pour pouvoir calculer cette intégrale.

Calcul du terme dépendant de la trajectoire avec l'hypothèse de la trajectoire linéaire

Pour pouvoir calculer le terme dépendant de la trajectoire, deux solutions sont possibles :

- 1) Soit on néglige les conductances de transfert (G_{ij}). Mais, dans le cas d'un réseau réduit aux nœuds internes des générateurs, cette approximation entraîne une erreur importante puisque les conductances de transfert comprennent non seulement les conductances des lignes, qui sont négligeables, mais aussi les conductances des charges qui elles ne sont pas négligeables.
- 2) Soit on estime la trajectoire post-défaut du système. L'estimation utilisée, dans la plupart des cas, est l'hypothèse d'une trajectoire linéaire entre $(\tilde{\delta}^s)$ et $(\tilde{\delta})$. Cette estimation a été introduite par Uyemura en 1972 [UYE-72]. Elle permet d'obtenir une formulation algébrique pour la FET.

Si on suppose que la trajectoire est linéaire, les angles rotoriques s'expriment de la façon suivante :

$$\tilde{\delta}_i = \tilde{\delta}_i^D + (\tilde{\delta}_i^A - \tilde{\delta}_i^D) \times \alpha \quad \text{avec } \alpha \in [0,1] \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (\text{I-17})$$

Avec $\tilde{\delta}_i^D$ qui est l'angle de la machine i au point de départ de la trajectoire, et $\tilde{\delta}_i^A$ qui est son angle au point d'arrivée.

Si on remplace $\tilde{\delta}_i$ et $\tilde{\delta}_j$ par l'équation I-17, on obtient :

$$d(\tilde{\delta}_i + \tilde{\delta}_j) = \frac{\tilde{\delta}_i^A - \tilde{\delta}_i^D + \tilde{\delta}_j^A - \tilde{\delta}_j^D}{(\tilde{\delta}_i^A - \tilde{\delta}_j^A) - (\tilde{\delta}_i^D - \tilde{\delta}_j^D)} d(\tilde{\delta}_i - \tilde{\delta}_j) \quad (\text{I-18})$$

On peut alors facilement calculer le terme dépendant de la trajectoire en remplaçant $d(\tilde{\delta}_i + \tilde{\delta}_j)$ par l'équation I-18.

Ceci donne :

$$\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n E_i E_j G_{ij} \left[\int_{\tilde{\delta}_i^s + \tilde{\delta}_j^s}^{\tilde{\delta}_i + \tilde{\delta}_j} \cos \tilde{\delta}_{ij} d(\tilde{\delta}_i + \tilde{\delta}_j) \right] = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n E_i E_j G_{ij} \frac{\tilde{\delta}_i - \tilde{\delta}_i^s + \tilde{\delta}_j - \tilde{\delta}_j^s}{(\tilde{\delta}_i^s - \tilde{\delta}_j^s) - (\tilde{\delta}_i - \tilde{\delta}_j)} \left(\sin(\tilde{\delta}_i^s - \tilde{\delta}_j^s) - \sin(\tilde{\delta}_i - \tilde{\delta}_j) \right) \quad (\text{I-19})$$

Grâce à l'approximation de la trajectoire linéaire, on obtient donc une formulation analytique pour V qui est facile à calculer.

Cependant, cette hypothèse peut conduire à des résultats erronés si la trajectoire post-défaut est loin d'être linéaire. Ce qui est souvent le cas lorsque plusieurs machines tendent à perdre le synchronisme.

d) Définition du domaine de stabilité

Avant d'aborder les méthodes qui permettent de calculer l'énergie critique. Nous allons donner quelques définitions sur le domaine de stabilité. Ceci permettra de bien comprendre les différentes méthodes FET.

Les points d'équilibre

Un réseau composé de n machines a plusieurs points d'équilibre. Ceux-ci sont définis par les équations suivantes :

$$\begin{aligned} \dot{\delta}_i &= 0 \\ \dot{\omega}_i &= 0 \quad i = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \tag{I-20}$$

Ces points peuvent être calculés à l'aide de la méthode de NEWTON-RAPHSON [KUN-94], ou par la minimisation de l'expression $\sum_{i=1}^n (P_{ei} - P_{mi})^2$. La dernière méthode est préférable pour le calcul des points d'équilibre instables, la méthode de DAVIDON-FLETCHER-POWELL [KUN-94] est en particulier très appropriée.

La figure I-5 représente l'énergie potentielle, en fonction des angles rotoriques, pour un système de trois machines. L'énergie potentielle est tracée en fonction de deux angles rotoriques seulement car le troisième est fonction des deux autres, si on utilise le centre d'inertie angulaire comme référence .

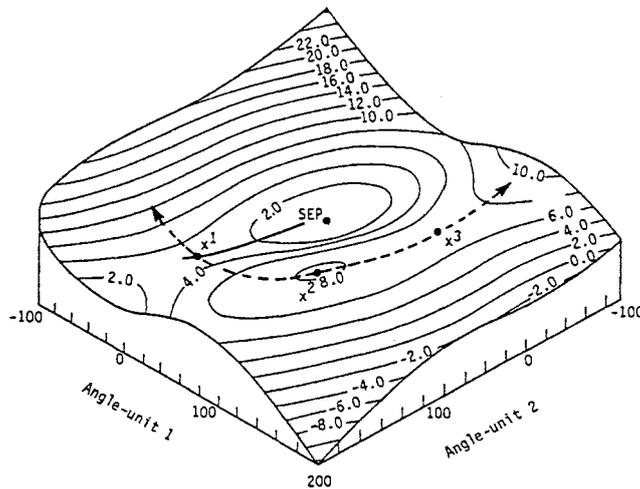


Figure I-5 : Exemple de surface d'énergie potentielle pour un système de 3 machines [KAK-78]

Le point SEP est un Point d'Equilibre Stable (PES), il se situe au fond de la cuvette. La fonction d'énergie potentielle a un minimum relatif à ce point.

Les points X1, X2 et X3 sont des Points d'Equilibre Instable (PEI). On remarque qu'il en existe deux types. Les points qui sont situés au sommet d'une bosse et où l'énergie potentielle a un maximum relatif (X2), et les points qui sont situés à un col (X1, X3).

Le domaine de stabilité

Un domaine de stabilité est défini par rapport à un PES. Dans un système donné, il y a généralement plusieurs PES. Celui qui nous intéresse est le PES post-défaut.

Le domaine de stabilité est en fait la zone d'attraction de ce point. Il est constitué par l'ensemble des points $(\tilde{\delta}, \tilde{\omega})$, tel que lorsque $t \rightarrow \infty$, la trajectoire du système issue de ces points converge vers le PES post-défaut.

Dans le cas de la figure I-5, le domaine de stabilité associé au point d'équilibre stable appelé "SEP" correspond à la cuvette entourant ce point.

La Surface Limite d'Energie Potentielle

La notion de Surface Limite d'Energie Potentielle (SLEP) a été proposée par Kakimoto en 1978 [KAK-78]. Dans [CHI-88], Chiang en a posé les bases théoriques. La SLEP correspond à la limite du domaine de stabilité projeté dans l'espace des angles rotoriques. Elle est formée en joignant les PEIs entourant le PES. Dans la figure I-5, les points X1, X2, X3 sont joints pour obtenir une partie de la SLEP (ligne tracée en pointillé).

Maintenant que nous avons donné les définitions relatives au domaine de stabilité, nous allons présenter les principales méthodes de calcul de l'énergie critique.

e) La méthode "closest UEP (Unstable Equilibrium Point)"

La méthode closest UEP a été la première méthode utilisée pour déterminer l'énergie critique [CHI-89b]. Elle se décompose en quatre étapes qui sont :

- Trouver tous les PEIs du type "col" se trouvant sur la SLEP entourant le PES post-défaut.
- Calculer la valeur de l'énergie potentielle en chacun de ces PEIs.
- Sélectionner le PEI qui a l'énergie potentielle la plus faible. Ce point est le Closest UEP.
- L'énergie critique est égale à l'énergie potentielle en ce point.

Avantages de la méthode closest UEP

- Cette méthode permet de traiter la stabilité multi-oscillation puisque l'énergie critique est égale à l'énergie potentielle minimum sur la SLEP. Si l'énergie totale du système à l'élimination du défaut est inférieure à l'énergie critique, la trajectoire du système ne peut pas sortir du domaine de stabilité quelle que soit sa direction.

Inconvénients de la méthode closest UEP

- La recherche de l'ensemble des PEIs du type "col", situés sur la SLEP, nécessite énormément de calculs et prend donc beaucoup de temps.
- Les résultats, trouvés avec cette méthode, peuvent être très pessimistes. En effet, la trajectoire du système peut sortir du domaine de stabilité à un point où l'énergie potentielle est très supérieure à l'énergie critique, puisque celle-ci est égale à l'énergie potentielle minimum sur la SLEP. Le système peut alors être considéré instable, bien qu'il soit très stable en réalité.

Conclusion

A cause de sa trop grande conservativité et de sa lenteur excessive, cette méthode a complètement été abandonnée pour l'analyse de la stabilité transitoire en temps réel.

f) La méthode PEBS ("Potential Energy Boundary Surface")

La méthode PEBS a été proposée pour la première fois par Kakimoto [KAK-78] en 1978. Dans cette méthode, l'énergie critique est déterminée, en calculant l'énergie potentielle, au point d'intersection de la trajectoire de défaut avec la SLEP. Une illustration de cette méthode est donnée dans la figure I-6.

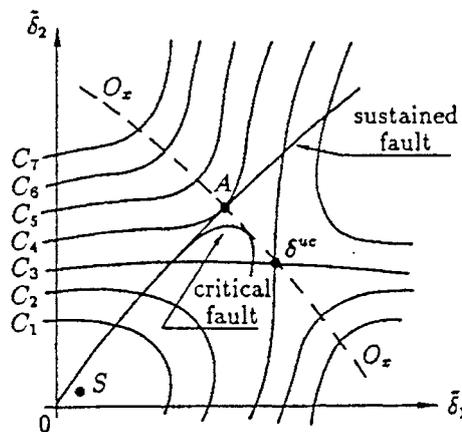


Figure I-6 : Illustration de la méthode PEBS [PAI-89]

Cette figure représente la trajectoire avec le défaut maintenu en permanence, et la trajectoire critique ment stable (juste stable), sur la surface d'énergie potentielle. L'intersection entre la première trajectoire et la SLEP (O_x) s'effectue au point A. La méthode PEBS estime donc l'énergie critique égale à l'énergie potentielle en ce point. La véritable énergie critique étant égale à l'énergie potentielle au sommet de la trajectoire critique ment stable.

La détermination de l'énergie critique s'effectue donc en trois étapes :

- Calcul de la trajectoire du système avec le défaut maintenu en permanence.
- Recherche du point d'intersection entre la trajectoire de défaut et la SLEP du système post-défaut.
- L'énergie critique est estimée égale à l'énergie potentielle à ce point d'intersection.

Pour détecter le point d'intersection avec la SLEP, on calcule l'énergie potentielle le long de la trajectoire de défaut en utilisant les paramètres post-défaut. Lorsqu'un maximum d'énergie potentielle est rencontré le long de cette trajectoire, cela signifie que la SLEP vient d'être traversée. La trajectoire de défaut est utilisée pour estimer la trajectoire critique ment instable (juste instable). L'utilisation de la trajectoire de défaut permet de gagner du temps car elle sort rapidement du domaine de stabilité si le défaut est maintenu en permanence. De plus, le pas d'intégration peut être plus important puisque la trajectoire de défaut est relativement rectiligne.

Avantages de la méthode PEBS

- La méthode PEBS est une méthode rapide et très simple. Les calculs nécessaires sont peu nombreux, il suffit d'intégrer les équations différentielles du système dans sa configuration de défaut jusqu'à la détection de la SLEP. Il n'y a donc pas de PEI à calculer, ce qui évite les problèmes de convergence et les calculs de minimisation.
- Comme on connaît la trajectoire du système, le terme dépendant de la trajectoire dans la FET (voir § I.3.3.1.c) peut facilement être calculé à l'aide d'une méthode d'intégration trapézoïdale par exemple. L'approximation de la trajectoire linéaire est ainsi évitée, et le calcul de l'énergie critique est plus précis.

Inconvénients de la méthode PEBS

- Cette méthode donne des résultats précis à condition que la trajectoire de défaut soit proche de la trajectoire critique ment instable. Or, ceci n'est évidemment pas toujours le cas.
- La stabilité ne peut être traitée que sur la première oscillation, puisque l'énergie critique n'est calculée qu'en prenant en compte la direction de la trajectoire sur la première oscillation.

g) Les méthodes basées sur le "controlling UEP (Unstable Equilibrium Point)"

Le concept du controlling UEP [CHI-95b] [CHI-89a] a été introduit par ATHAY en 1979 [ATH-79]. Le controlling UEP est le PEI du type col vers lequel se dirige la trajectoire lors de la première oscillation. Ce concept permet de corriger la conservativité et la lenteur de la

méthode closest UEP. Il a ainsi permis de relancer l'application de la méthode FET à l'analyse de la stabilité transitoire des réseaux électriques.

Les méthodes basées sur le controlling UEP sont composées de deux étapes :

- 1) Recherche du controlling UEP.
- 2) Calcul de l'énergie critique qui est égale à l'énergie potentielle au controlling UEP.

La première étape est très difficile à réaliser. En effet, il est très dur de trouver le bon controlling UEP suffisamment rapidement pour que la méthode soit applicable en temps réel. Différentes techniques, qui sont présentées plus loin, ont été proposées au cours des années 80 pour résoudre ce problème.

Avantages des méthodes controlling UEP

- Ces méthodes prennent en compte la direction de la trajectoire du système lors de la première oscillation, elles donnent donc une estimation moins conservatrice de l'énergie critique que la méthode closest UEP. De plus, elle nécessite la recherche que d'un seul PEI, d'où un gain de temps considérable.
- Elles donnent une estimation de l'énergie critique qui est toujours conservatrice si le controlling UEP est correctement localisé. En effet, la trajectoire critique instable du système ne peut sortir que par un point où l'énergie potentielle est supérieure ou égale à l'énergie potentielle au controlling UEP, puisque celui-ci est un PEI du type "col".

Inconvénients des méthodes controlling UEP

- Malgré la prise en compte de la direction de la trajectoire, ces méthodes demeurent lentes car la recherche du controlling UEP n'est pas une tâche facile pour un réseau de taille réelle. Il faut utiliser une procédure de minimisation qui prend beaucoup de temps, car le nombre de variables d'état est élevé. De plus, le point de départ pour cette procédure de minimisation doit être suffisamment proche du controlling UEP, afin que la convergence soit correcte.
- Les résultats peuvent être dans certains cas très conservatifs, malgré l'utilisation du PEI de type "col" situé dans la direction de la première oscillation. En effet, la trajectoire critique instable peut tout à fait sortir du domaine de stabilité à un point où l'énergie potentielle est très supérieure à l'énergie potentielle au controlling UEP. Dans ce cas-là, le TEC est estimé beaucoup trop faible.
- Ces méthodes sont limitées à la modélisation classique car on ne connaît pas la trajectoire du système jusqu'au controlling UEP. On n'est donc pas obligé d'utiliser l'hypothèse de la trajectoire linéaire pour pouvoir calculer la valeur de la FET (voir § I.3.3.1.c). Ceci entraîne non seulement une erreur qui peut être importante si la trajectoire est loin d'être

linéaire, mais empêche aussi l'utilisation d'une modélisation plus détaillée. En effet, une formulation algébrique est difficile à obtenir pour la FET si on utilise une modélisation détaillée, et elle est de toute façon très imprécise [PAV-94].

- Seule la stabilité sur la première oscillation peut être traitée car ces méthodes recherchent uniquement le PEI de type col situé dans la direction de la première oscillation.

h) Calcul du controlling UEP

Pour converger correctement vers le controlling UEP, il est nécessaire d'avoir un bon point de départ pour la procédure de minimisation de la fonction $\sum_{i=1}^n \|P_{mi} - P_{ei}\|$. Plusieurs méthodes ont été proposées pour déterminer ce point de départ [ATH-79] [RIB-76] [FOU-92] [CHI-94]. Nous présentons ci-dessous que les deux principales.

La méthode MOD ("Mode Of Disturbance")

La méthode MOD, proposée par Fouad [FOU-92] dans le début des années 80, a beaucoup été utilisée jusqu'en 1989.

Elle est basée sur l'hypothèse que lorsqu'une instabilité apparaît, les machines se séparent en deux groupes : un groupe de générateurs critiques fortement perturbés (MOD), et un groupe de générateurs faiblement perturbés. Selon cette technique, on peut déterminer le point de départ de la minimisation en connaissant le groupe des machines critiques.

La méthode MOD se décompose en trois parties :

- 1) Identification des générateurs critiques.
- 2) Recherche d'un point de départ pour la procédure de minimisation. Pour déterminer les coordonnées de ce point, les angles des machines qui sont considérées critiques sont fixés à une valeur, au-delà de laquelle une machine est considérée instable (par exemple 90°).
- 3) Détermination du controlling UEP à l'aide de la procédure de minimisation.

Cette méthode ne permet pas de déterminer des points de départ suffisamment proches du controlling UEP. Ceci pour deux raisons. Premièrement, il est difficile d'identifier dans tous les cas quels sont exactement les générateurs critiques. Certains générateurs ne peuvent être que légèrement instables. Deuxièmement, le calcul du point de départ pour la minimisation est une tâche très difficile puisqu'il n'y a pas une valeur d'angle bien définie pour laquelle un générateur devient instable. Il est donc pratiquement impossible d'estimer correctement les coordonnées du controlling UEP à partir de la connaissance des générateurs critiques. Ainsi, la méthode MOD converge souvent vers un mauvais PEI, ou même vers un PES [RAH-93], surtout si le réseau est de grande taille et qu'il est très chargé.

Cette méthode est donc inapplicable à des réseaux de taille réelle et elle est complètement abandonnée à l'heure actuelle.

La méthode BCU ("Boundary of stability region based Controlling Unstable equilibrium point")

La méthode BCU a été proposée par Chiang en 1989 [CHI-89a]. Elle est une amélioration de la méthode PEBS et a pour objectif d'améliorer la précision de cette dernière.

Le principe de cette méthode est de déterminer le Controlling UEP d'un système en déterminant le Controlling UEP d'un système de dimensions réduites. On gagne ainsi du temps car le Controlling UEP du système de dimensions réduites est plus rapide à trouver que celui du système original.

Système de dimensions réduites

Le modèle original avec la modélisation classique est :

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{\delta}}_i &= \tilde{\omega}_i \\ M_i \dot{\tilde{\omega}}_i &= (P_{mi} - P_{ei}) - \frac{M_i}{M_T} P_{ci} \quad i = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (I-21)$$

Ce modèle devient une fois la réduction effectuée selon la méthode BCU [CHI-94]:

$$\dot{\tilde{\delta}}_i = P_{mi} - P_{ei} - \frac{M_i}{M_T} P_{ci} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (I-22)$$

Nous pouvons remarquer que le modèle réduit est de dimension n alors que le modèle original est de dimension 2n. Les variables d'état du modèle réduit sont composées uniquement des angles rotoriques.

Avec l'hypothèse que les conductances de transfert sont faibles, on peut montrer que $(\tilde{\delta})$ est un PEI situé sur la limite de stabilité du système réduit si et seulement si $(\tilde{\delta}, 0)$ est un PEI situé sur la limite de stabilité du système original [CHI-95a]. La méthode BCU utilise cette propriété pour trouver plus rapidement le Controlling UEP du système original.

Algorithme de la méthode BCU

- 1) Calculer la trajectoire du système avec le défaut maintenu en permanence. Déterminer ensuite le point d'intersection entre cette trajectoire et la SLEP. Enfin, projeter ce point dans le sous-espace des angles rotoriques. Cette première étape correspond à l'application de la méthode PEBS.

- 2) Intégrer le système post-défaut de dimensions réduites le long de la SLEP, en utilisant le point d'intersection trouvé dans la première étape comme conditions initiales. Arrêter l'intégration lorsque l'expression $\sum_{i=1}^n \|P_{mi} - P_{ei}\|$ atteint son premier minimum local.
- 3) A partir de ce point, calculer le Controlling UEP (δ_{co}) du système réduit en minimisant l'expression $\sum_{i=1}^n \|P_{mi} - P_{ei}\|$.
- 4) Calculer le Controlling UEP du système original qui est égal à $(\delta_{co}, 0)$.

On remarque que la méthode BCU est bien une amélioration de la méthode PEBS. Son principe est de trouver le Controlling UEP le plus proche du point de sortie déterminé avec la méthode PEBS.

Avantages de la méthode BCU

- La méthode BCU détermine un bon point de départ pour la procédure de minimisation. Ceci en fait la méthode la plus précise et la plus fiable pour déterminer le Controlling UEP [RAH-93].

Inconvénients de la méthode BCU

- La méthode BCU permet d'obtenir des résultats plus fiable que la méthode MOD, mais elle n'est pourtant pas fiable à 100 %. Le risque de converger vers un mauvais PEI ou vers un PES n'est pas exclu. En effet, la première partie de la méthode BCU est l'application de la méthode PEBS. Si la trajectoire de défaut est très différente de la trajectoire critique instable, la méthode BCU peut converger vers un mauvais PEI. Il peut y avoir un risque de divergence aussi lors de l'intégration de système réduit le long de la SLEP. En effet, il est difficile de suivre la SLEP puisque c'est une crête sur la surface d'énergie potentielle. Il faut donc utiliser un petit pas d'intégration pour réduire les risques de divergence. Une méthode appelée méthode "shadowing" [TRE-96] a été proposée récemment pour résoudre ce problème de divergence.
- Malgré l'utilisation d'un système de dimension réduite, la méthode BCU demande beaucoup de calculs. Elle n'est donc pas très rapide, beaucoup moins que la méthode PEBS.

1.3.4 Les méthodes hybrides

Les méthodes hybrides utilisent à la fois la simulation numérique et une méthode directe. Contrairement aux méthodes FET décrites précédemment, elles simulent la trajectoire entière du système (pendant et après le défaut) jusqu'à la détermination de la stabilité du réseau. La méthode directe n'est donc utilisée que pour calculer l'indice de stabilité, cet indice permettant

de mesurer le degré de stabilité ou d'instabilité du réseau. On tire ainsi partie des avantages de la simulation numérique (fiabilité et précision) et des méthodes directes (capacité à calculer rapidement un indice de stabilité).

1.3.4.1 La méthode hybride basée sur la fonction d'énergie transitoire

Cette méthode a été proposée par Maria en 1989 [MAR-90]. Comme toutes les méthodes hybrides, la détermination de la stabilité s'effectue à partir de la simulation complète de la trajectoire. Un indice de stabilité est ensuite calculé à l'aide de la méthode FET.

a) Principe

La méthode hybride FET est donc une combinaison de deux méthodes d'analyses qui sont la simulation numérique et la FET. Elle se décompose en deux étapes :

- 1) Simulation complète de la trajectoire du système, avec le temps d'élimination du défaut égal au temps d'élimination réel.
- 2) Calcul du Temps d'Élimination Critique (TEC) à l'aide de la FET et de la simulation numérique effectuée précédemment.

La première étape prend du temps car il faut intégrer les équations différentielles du système jusqu'à ce que l'on puisse déterminer si le système est stable ou instable. Il est donc très important d'utiliser de bons critères d'arrêt qui permettent de déterminer rapidement la stabilité du système.

La deuxième étape est rapide. La détermination du TEC à l'aide de la FET demande peu de calculs.

b) Calcul du temps d'élimination critique avec la FET

Si le réseau est instable, le calcul de l'énergie critique ne pose pas de problèmes. Celle-ci est considérée égale au maximum d'énergie potentielle le long de la trajectoire. Cette technique de calcul de l'énergie critique s'appuie sur l'hypothèse que le système sort du domaine de stabilité au point où l'énergie potentielle atteint un maximum, et que le point de sortie de la trajectoire calculée est proche du point de sortie de la trajectoire critique instable.

Dans le cas où le réseau est stable, le calcul de l'énergie critique est beaucoup plus difficile. En effet, il faut estimer, à partir de la trajectoire stable, le point par lequel la trajectoire critique instable va sortir du domaine de stabilité.

Différentes méthodes ont été proposées pour calculer l'énergie critique lorsque le système est stable. Aucune n'est vraiment efficace lorsque la trajectoire est complexe. Nous présenterons ici que la plus simple car le calcul du TEC pour un défaut stable ne nous intéresse pas vraiment dans l'analyse de la sécurité dynamique. En effet, lorsqu'un défaut potentiel est

trouvé stable, il est immédiatement écarté et il ne fait plus l'objet d'étude. Il est donc inutile de calculer le TEC pour un tel défaut.

Calcul de l'énergie critique lorsque le réseau est stable

La technique présentée ici, pour calculer l'énergie critique lorsque le réseau est stable, est la technique la plus simple et la plus ancienne. Elle a été proposée par Maria en 1990 [MAR-90]. L'énergie critique est déterminée à partir d'une droite passant par le PES post-défaut et le sommet de la première oscillation. Elle est considérée égale au premier maximum d'énergie potentielle trouvée sur cette droite, à partir du PES post-défaut. L'énergie potentielle est bien évidemment calculée en utilisant l'hypothèse de la trajectoire linéaire. Une illustration de cette méthode est donnée dans la figure I-7.

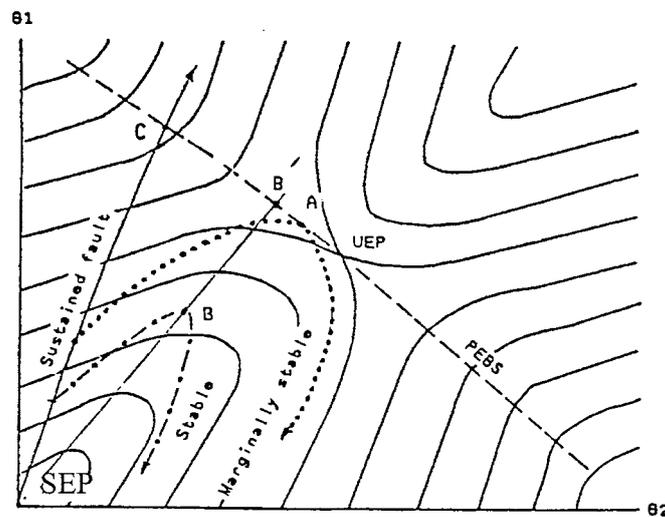


Figure I-7 : Calcul de l'énergie critique avec la technique de la ligne droite [MAR-90].

Cette figure représente les trajectoires d'un système, composé de trois machines, sur la surface d'énergie potentielle. Le point SEP est le PES post-défaut. La ligne discontinue, appelée PEBS, est la SLEP associée à ce point. Le point C est le point de sortie trouvé avec la méthode PEBS. Le point UEP est le controlling UEP. Le point B est le sommet de la trajectoire stable. La droite de recherche passe par ce point et le PES post-défaut. Le maximum d'énergie potentielle sur cette droite est trouvé au point B' qui est à l'intersection entre cette ligne et la SLEP. L'énergie critique est donc estimée égale à l'énergie potentielle en ce point.

On remarque que cette technique est très simple et donc très rapide. Cependant, l'estimation n'est pas toujours très bonne. Dans ce cas-là, la véritable énergie critique se trouve au point A qui correspond au sommet de la trajectoire critique ment stable. L'erreur est ici peu importante, mais elle aurait pu l'être bien plus si la trajectoire avait été plus complexe. De plus, l'énergie potentielle ne peut être calculée qu'en utilisant l'hypothèse de la trajectoire linéaire, ce qui

introduit une erreur supplémentaire dans le calcul de l'énergie critique. Cette méthode est donc loin de fournir des résultats toujours corrects.

D'autres méthodes ont été proposées [TAN-94] [MAN-95] [VAA-96] pour trouver plus précisément le point de sortie de la trajectoire critique instable. Mais elles sont beaucoup plus lentes car elles nécessitent des simulations supplémentaires. De plus, nous avons réalisé des essais qui montrent qu'elles ne sont guère plus précises.

c) Les critères d'arrêt pour la simulation numérique

La méthode hybride FET est constituée d'une partie basée sur la simulation numérique. Cette partie est de loin celle qui prend le plus de temps. Il est donc très important d'arrêter aussitôt que possible la simulation numérique si on veut pouvoir utiliser cette méthode en temps réel. Pour cela, il faut utiliser des critères d'arrêt qui soient capables de déterminer rapidement la stabilité du réseau. Différents critères ont déjà été proposés depuis l'apparition de la méthode hybride FET [MAR-90] [CHU-95] [DON-91]. Ils sont présentés et étudiés dans le chapitre IV.

d) Analyse de la méthode hybride FET

Avantages de la méthode hybride FET

- Cette méthode est très fiable dans le jugement de la stabilité du réseau grâce à l'utilisation de la simulation numérique.
- La simulation numérique permet aussi de prendre en compte des modélisations plus détaillées que la modélisation classique.
- La FET peut être calculée sans approximations puisqu'on connaît la trajectoire du système. Les calculs de l'énergie critique et du TEC sont donc plus précis. Ceci n'est vrai que si le réseau est instable. S'il est stable, le calcul de l'énergie critique nécessite des approximations. Mais comme l'énergie critique n'a pas besoin d'être calculée lorsque le réseau est stable, le problème ne se pose pas.

Inconvénient de la méthode hybride FET

- Cette méthode est assez lente puisque la trajectoire entière (avant et après l'élimination du défaut) du système doit être calculée jusqu'à la détermination de la stabilité.

I.3.4.2 La méthode hybride basée sur la méthode EEAC ("Extended Equal Area Criterion")

La méthode EEAC est une méthode directe d'analyse qui ne nécessite pas de simulations numériques en principe. Mais en réalité, une simulation numérique entière de la trajectoire est nécessaire pour qu'elle fournisse de bons résultats. Elle n'est donc pas vraiment une méthode

directe. C'est la raison pour laquelle elle est présentée dans ce chapitre consacré aux méthodes hybrides.

a) La méthode EEAC

Principe

La méthode EEAC a été proposée par Xue en 1988 [XUE-88]. Elle estime la stabilité transitoire d'un réseau électrique en appliquant le critère d'égalité des aires à un système équivalent d'une machine connectée à un noeud de puissance infinie. Ce système équivalent sera appelé par la suite système OMIB ("One Machine Infinite Bus system). Cette méthode estime donc très rapidement la stabilité d'un réseau puisque l'indice de stabilité repose sur une formulation algébrique. La figure I-8 donne une illustration de cette méthode. Les surfaces A_{acc} et A_{dec} représentent les surfaces d'accélération de décélération de la machine équivalente. δ_e est l'angle rotorique de cette machine lorsque le défaut est éliminé. Le TEC correspond à la durée du défaut pour laquelle les surfaces d'accélération et de décélération sont égales.

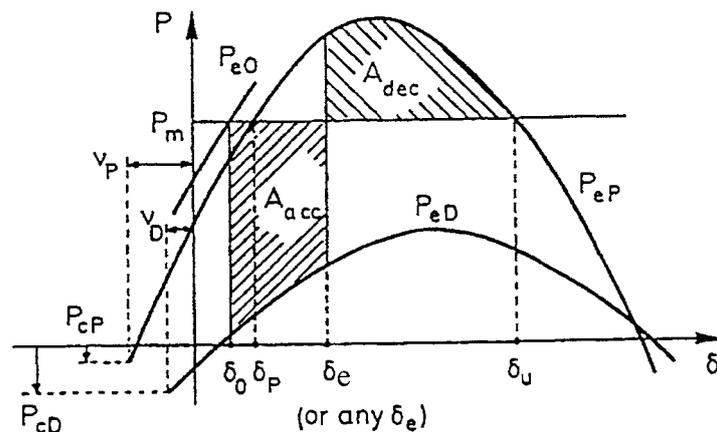


Figure I-8 : Illustration de la méthode EEAC [PAV-94]

La méthode EEAC se décompose en deux étapes principales :

- Calcul du système OMIB.
- Calcul du TEC à l'aide du critère d'égalité des aires appliqué au système OMIB.

La deuxième étape ne pose pas de problèmes puisque l'application du critère d'égalité des aires est simple et rapide. La première étape est par contre beaucoup plus critique. Cette étape consiste à calculer les paramètres du système OMIB. Pour cela, la procédure suivante est utilisée :

- Pour un défaut donné, décomposer le réseau en deux groupes de machines : un groupe de machines peu perturbées et un groupe de machines fortement perturbées.

- Remplacer chacun de ces deux groupes de machines par une machine équivalente. Ces machines équivalentes correspondent au centre d'inertie angulaire (voir annexe I).
- Réduire le système, composé des deux machines équivalentes, à un système d'une machine connectée à un noeud de puissance infinie.

La première étape est la plus compliquée à réaliser. En effet, il n'est pas toujours facile de décomposer un réseau en deux groupes de machines. Certains générateurs peuvent être moyennement perturbés, il est alors difficile de savoir à quel groupe les rattacher. De plus, il peut exister plus de deux groupes de machines différents dans un réseau. La méthode EEAC est alors inapplicable.

La technique, utilisée pour décomposer le réseau en deux groupes de machines, utilise la simulation numérique complète de la trajectoire. Cette méthode est la seule méthode suffisamment fiable pour cette tâche. D'autres techniques beaucoup plus rapides ont été utilisées auparavant mais sans succès.

La procédure utilisée, pour décomposer le réseau en deux groupes de machines, est détaillée dans l'annexe II. Une fois les deux groupes de machines constitués, l'application de la méthode EEAC ne pose plus de problèmes. Les relations permettant de calculer les paramètres du système OMIB sont données dans l'annexe I.

b) Analyses de la méthode hybride EEAC

Avantages de la méthode hybride EEAC

- L'indice de stabilité est simple et rapide à calculer.

Inconvénients de la méthode hybride EEAC

- Elle ne peut s'appliquer que si le réseau se décompose en deux groupes de machines distincts.
- La détermination de ces deux groupes est lente puisqu'il faut utiliser la simulation numérique. C'est l'étape qui prend le plus de temps. Elle fait perdre beaucoup d'intérêts à la méthode EEAC dont le principal point fort à l'origine était la rapidité. L'utilisation de la simulation numérique rend cette méthode aussi lente que la méthode hybride FET.
- Cette méthode ne peut être utilisée qu'avec la modélisation classique. Si on utilise un modèle plus détaillé, les paramètres du système OMIB ne peuvent plus être calculés. Il est possible de contourner ce problème [PAV-94], mais l'application de la méthode EEAC devient alors compliquée.

I.4 CONCLUSION

Nous avons, dans ce chapitre, présenté et analysé les principales méthodes d'analyses de la stabilité transitoire. Aucune de ces méthodes n'a les caractéristiques nécessaires pour être appliquées au filtrage des contingences. Cependant, certaines sont plus intéressantes que d'autres.

Les méthodes basées seulement sur la simulation numérique sont très précises, mais elles sont trop lentes. Les méthodes de reconnaissance de forme ne sont pas applicables, pour l'instant, à cause de la nature combinatoire des réseaux électriques. Il faut réaliser un nombre extrêmement élevé de simulations dans la phase d'apprentissage, pour que ces méthodes donnent des résultats corrects.

Nous avons donc choisi d'étudier et de développer les méthodes directes et hybrides. Ces méthodes ne correspondent pas, telles qu'elles existent, aux caractéristiques nécessaires pour le filtrage. Mais ce sont celles qui s'en rapprochent le plus.

CHAPITRE II

ANALYSE COMPARATIVE DES METHODES D'ANALYSE DE LA STABILITE TRANSITOIRE

CHAPITRE II

ETUDE COMPARATIVE DES METHODES D'ANALYSE DE LA STABILITE TRANSITOIRE

Dans ce chapitre, nous allons comparer la fiabilité et la précision de plusieurs méthodes d'analyse de la stabilité transitoire. Nous avons vu dans le chapitre précédent que les méthodes directes et hybrides sont les plus intéressantes pour le filtrage. Par conséquent, nous étudierons et comparerons les méthodes PEBS, BCU, hybride FET et hybride EEAC. A la suite de cette étude comparative, nous tirerons des conclusions sur les possibilités d'application de ces méthodes au filtrage des contingences.

II.1 CONDITIONS D'ESSAIS

Ces méthodes ont été testées sur quatre réseaux électriques qui sont :

- Le réseau New-England(10 machines).
- Le réseau réduit de l'état d'Iowa (17 machines).
- Le réseau IEEE 20 machines.
- Le réseau Colombien (44 machines).

Ces quatre réseaux sont présentés dans l'annexe III. Le logiciel utilisé pour programmer les différentes méthodes et effectuer les simulations est le logiciel de calcul MATLAB. L'intégration des équation différentielles a été réalisée avec la méthode explicite de Runge-Kutta d'ordre 3. Cette méthode est couramment utilisée pour la simulation numérique car elle donne des résultats précis et fiables.

Les défauts étudiés dans les tests sont des courts-circuits triphasés non impédants entre la phase et la terre. Ces défauts sont les plus dangereux pour la stabilité du réseau. Dans nos essais, ils se produisent aux différents noeuds du réseau, et ils sont éliminés par la mise hors service de l'élément sur lequel ils se sont produits (ligne de transport ou transformateur). Ils sont soit fugitifs, soit permanents. Dans le premier cas, l'élément est tout de suite remis en service après l'élimination du court-circuit. Dans le deuxième cas, il est définitivement éliminé pour protéger le réseau. La liste des défauts à analyser est constituée en prenant en compte tous les noeuds, toutes les lignes et tous les transformateurs du réseau. Ainsi, on considère deux courts-circuits par ligne et par transformateur, un à chaque extrémité. Beaucoup de simulations sont donc réalisées pour chacune des méthodes. Ceci a permis de les tester très rigoureusement, grâce à la prise en compte de comportements différents des réseaux. Dans la

suite de ce rapport, les défauts seront notés de la façon suivante : [1] [1-2]. Cette notation signifie que le court-circuit s'est produit au noeud 1, et qu'il a été éliminé par la déconnexion de l'élément (ligne ou transformateur) reliant les noeuds 1 et 2. Si aucun élément n'est mis hors service, le défaut est noté [1] [0-0].

Pour juger la précision des différentes méthodes, le TEC (durée limite du défaut au-delà de laquelle le réseau est instable) estimé, par la méthode étudiée, est comparé au TEC réel. Ce dernier est calculé en utilisant la simulation numérique et une procédure de recherche itérative (méthode dichotomique). La précision du calcul est de 0.001s, sauf pour le réseau colombien où elle est égale à 0.01s. Seuls les courts-circuits qui ont un TEC inférieur à 0.35s sont pris en compte dans l'analyse et la présentation des résultats. Au-delà de cette valeur, ils sont trop stables pour être représentatifs car normalement un court-circuit est éliminé au bout de 0.1s environ.

La modélisation utilisée dans tous les essais est la modélisation classique, et la stabilité du réseau n'est vérifiée que sur la première oscillation. Ces deux simplifications ont été utilisées dans la plupart des études menées jusqu'à aujourd'hui sur l'analyse de la stabilité transitoire. Elles sont nécessaires pour que certaines méthodes étudiées soient applicables (méthodes BCU et hybride EEAC). Une étude sur la validité de ces deux simplifications sera menée dans le chapitre V.

II.2 ANALYSE DE LA METHODE PEBS

La méthode PEBS a peu été étudiée depuis son apparition. Cela est étonnant car c'est une méthode simple, rapide et qui peut donc s'appliquer en temps réel. En fait, elle est considérée comme une méthode peu précise et a donc été rapidement écartée.

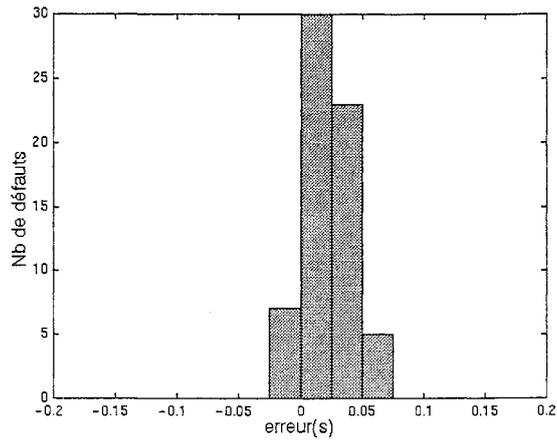
Dans le cadre du filtrage, cette méthode peut se révéler très intéressante grâce à sa rapidité. Le fait qu'elle ne soit pas très précise n'est pas très grave puisqu'il s'agit surtout d'écarter les défauts fortement stables. Cependant, pour que le filtrage soit efficace, il ne faut pas que cette imprécision soit trop importante. C'est ce que nous allons vérifier avec les tests réalisés ci-dessous.

II.2.1 Résultats des tests

Etant donné le nombre très important de simulations réalisées, nous avons choisi de présenter les résultats sous forme d'histogramme. Nous avons mis en abscisse l'erreur sur le TEC, et en ordonné le nombre de défauts compris dans les intervalles d'erreurs. Dans la figure II-1, par exemple, il y a 30 défauts pour lesquels l'erreur sur le TEC est comprise entre 0 et 0.025s, 23 défauts où l'erreur est comprise entre 0.025 et 0.05s, etc. ...

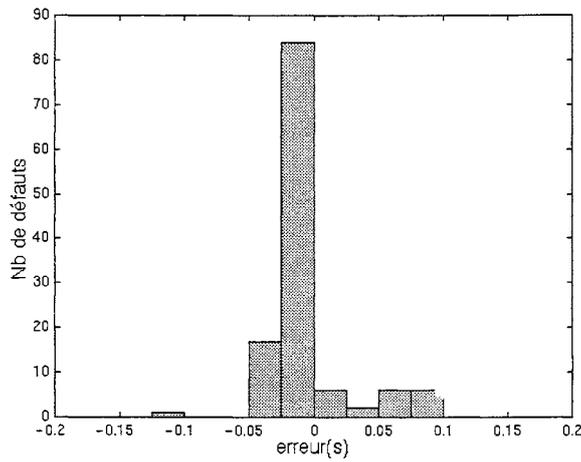
L'erreur est égale à la différence entre le TEC estimé et le TEC réel (erreur = TEC estimé - TEC réel).

051 097977 1



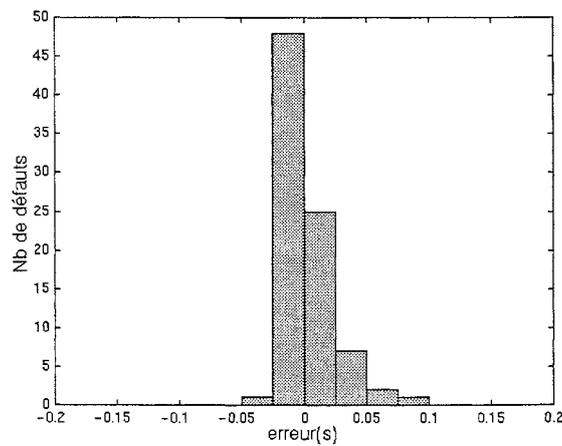
Erreur minimum = -0.008s Erreur maximum = +0.07s Nombre total de défauts : 65

Figure II-1 : Résultats des tests avec le réseau New-England



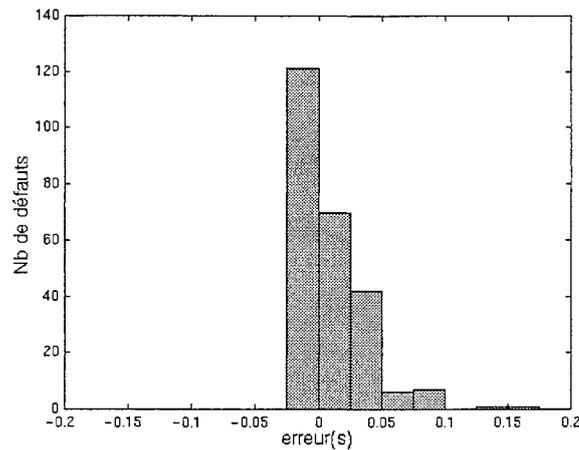
Erreur minimum = -0.116s Erreur maximum = +0.083s Nombre total de défauts : 122

Figure II-2 : Résultats des tests avec le réseau Iowa State



Erreur minimum = -0.028s Erreur maximum = +0.085s Nombre total de défauts : 84

Figure II-3 : Résultats des tests avec le réseau IEEE20



Erreur minimum = -0.02s Erreur maximum = +0.17s Nombre total de défauts : 248

Figure II-4 : Résultats des tests avec le réseau colombien

II.2.2 Analyse des résultats

En regardant les résultats ci-dessus, on se rend rapidement compte que la méthode PEBS est assez précise. La plupart des erreurs sont comprises entre -0.05s et 0.05s : 94% des erreurs pour le réseau New-England, 91% pour le réseau Iowa State, 96% pour le réseau IEEE20 et 94% pour le réseau colombien. Ceci montre que la précision de la méthode PEBS n'est pas si mauvaise qu'on a bien voulu l'affirmer.

Cependant, il existe quelques rares cas où l'erreur est tout de même très importante (>0.1s). Une erreur de 0.169s a même été trouvée avec le réseau colombien. Une telle erreur est énorme et montre les limites de la méthode PEBS. Les causes de ces erreurs seront étudiées dans le chapitre III.

Cette surestimation importante du TEC est très embêtante pour le filtrage car il faut prendre une grande marge d'erreur (0.2s environ dans le cas présent) pour être sûr qu'aucun défaut instable ne puisse être considéré stable. Or, une marge importante nuit considérablement à l'efficacité du filtrage, puisque seuls les défauts vraiment très stables peuvent alors être écartés. Mais le plus grave est qu'il est difficile d'estimer l'erreur maximum que l'on peut rencontrer. En utilisant la méthode PEBS pour filtrer, on est donc pas à l'abri d'une erreur dans la détermination de la stabilité. Cette méthode, telle qu'elle est mise en oeuvre, n'est donc pas utilisable pour le filtrage des contingences. Elle surestime parfois trop le TEC, ce qui fait que sa fiabilité (capacité à déterminer correctement la stabilité du réseau) est bonne, mais elle n'est pas égale à 100%. La stabilité du réseau peut donc être mise en danger.

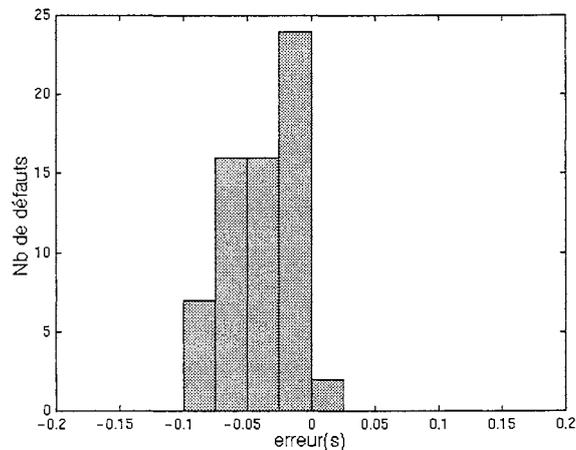
II.3 ANALYSE DE LA METHODE BCU

La méthode BCU a été beaucoup étudiée ces dernières années. Cette méthode est présentée comme une amélioration de la méthode PEBS puisqu'elle recherche le PEI du type col le plus

proche du point de sortie trouvé avec la méthode PEBS (voir § I.3.3.1.h). Elle permet donc d'obtenir des résultats toujours conservatifs. Cependant, elle est très coûteuse en temps de calcul, ce qui constitue un désavantage très important dans le cadre d'une application en temps réel.

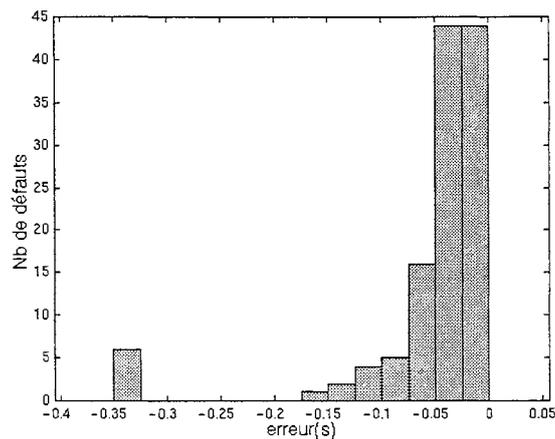
Dans les tests réalisés ci-dessous, nous avons utilisé la méthode "shadowing" [TRE-96] pour le calcul de la trajectoire du modèle réduit le long de la SLEP. Cette technique permet de limiter les risques de divergence.

II.3.1 Résultats des tests



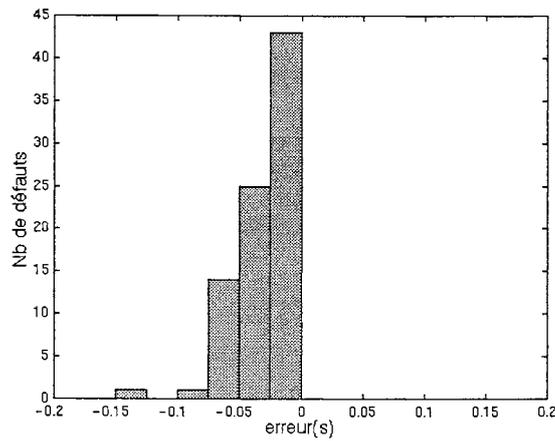
Erreur minimum = -0.094s Erreur maximum = +0.01s Nombre total de défauts : 65

Figure II-5 : Résultats des tests avec le réseau New-England



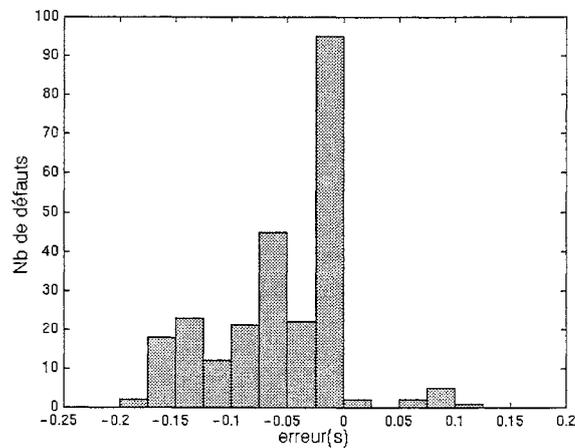
Erreur minimum = -0.347s Erreur maximum = -0.005s Nombre total de défauts : 122

Figure II-6 : Résultats des tests avec le réseau Iowa State



Erreur minimum = -0.139s Erreur maximum = -0.002s Nombre total de défauts : 84

Figure II-7 : Résultats des tests avec le réseau IEEE20



Erreur minimum = -0.179s Erreur maximum = +0.123s Nombre total de défauts : 248

Figure II-8 : Résultats des tests avec le réseau colombien

II.3.2 Analyse des résultats

Les résultats ci-dessus confirment que la méthode BCU donne des résultats quasiment toujours conservatifs. Les dix cas, pour lesquels l'erreur est positive, correspondent à une mauvaise convergence. La méthode BCU a convergé vers un mauvais PEI du type col. Sinon toutes les erreurs sont négatives ou très légèrement positives. Cette méthode est donc fiable dans la détermination de la stabilité du réseau. Ceci est très intéressant car les risques de mettre en danger le réseau sont faibles.

Cependant, les résultats sont souvent très conservatifs ($<-0.05s$) : 35% des erreurs sont inférieures à -0.05s avec le réseau New-England, 28% avec le réseau Iowa State, 19% avec le réseau IEEE20 et 48% avec le réseau Colombien. De plus, l'erreur est parfois très négative, elle atteint -0.347s avec le réseau Iowa State. Cette méthode n'est donc pas très précise dans le

calcul du TEC. Par conséquent, elle ne peut pas être utilisée pour le classement des contingences instables.

La recherche du PEI de type col le plus proche du point de sortie, trouvé avec la méthode PEBS, permet donc d'obtenir une fiabilité plus importante (TEC rarement surestimé) qu'avec la méthode PEBS. Cependant, la précision est moins bonne puisque le TEC est souvent fortement sous-estimé. Le calcul du controlling UEP n'apporte donc pas d'améliorations par rapport à la méthode PEBS. La fiabilité est augmentée, mais la précision est détériorée. De plus, elle nécessite beaucoup plus de calculs que la méthode PEBS.

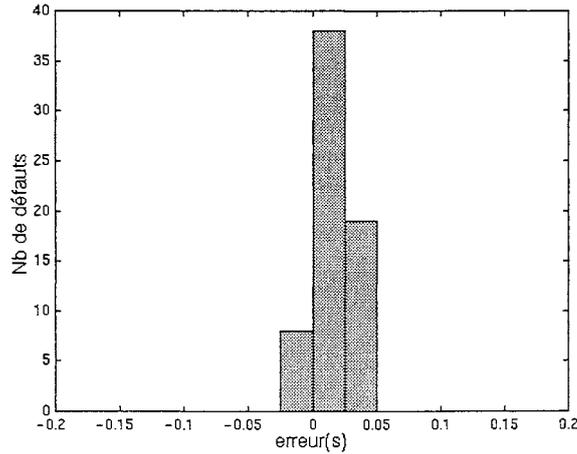
La méthode BCU, grâce à sa fiabilité relativement bonne, est plutôt intéressante pour la détermination rapide de la stabilité du réseau. Malheureusement, cette méthode est plutôt lente, et elle sous-estime beaucoup le TEC dans de nombreux cas. Des défauts fortement stables peuvent être considérés instables, ce qui entraîne des études détaillées inutiles. De plus, elle ne trouve pas toujours le vrai controlling UEP, à cause de problèmes de convergence. La détermination de la stabilité, avec la méthode BCU, n'est donc pas efficace, malgré la bonne fiabilité de cette méthode. Cette méthode ne présente donc pas d'intérêts, ni pour la détermination de la stabilité, ni pour le calcul du TEC.

II.4 ANALYSE DE LA METHODE HYBRIDE FET

La méthode hybride basée sur la FET a des caractéristiques qui la rendent très attractive pour le filtrage des contingences. En effet, l'utilisation de la simulation numérique complète de la trajectoire permet une détermination de la stabilité avec une fiabilité proche de 100%. Cette méthode a donc une réputation de méthode très fiable et très précise, mais aussi de méthode lente, à cause de l'utilisation de la simulation numérique complète de la trajectoire. Si cette méthode est effectivement plus lente que la méthode PEBS, elle est cependant plus rapide que la méthode BCU qui nécessite deux simulations numériques et une procédure de minimisation.

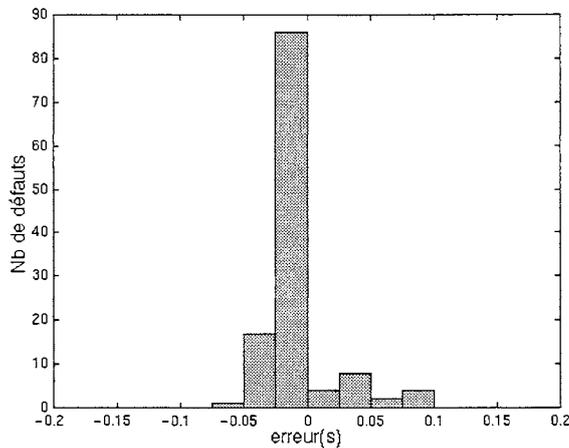
Dans nos essais, nous nous sommes attachés à tester la précision de cette méthode. Pour cela, nous avons réalisé des essais en prenant le Temps d'Elimination (TE) de chaque défaut égal au $TEC+0.1$ s. Nous n'avons pas testé cette méthode avec des TE inférieur au TEC car l'estimation du TEC n'a pas besoin d'être réalisée dans le filtrage lorsque le réseau est stable.

II.4.1 Résultats des tests



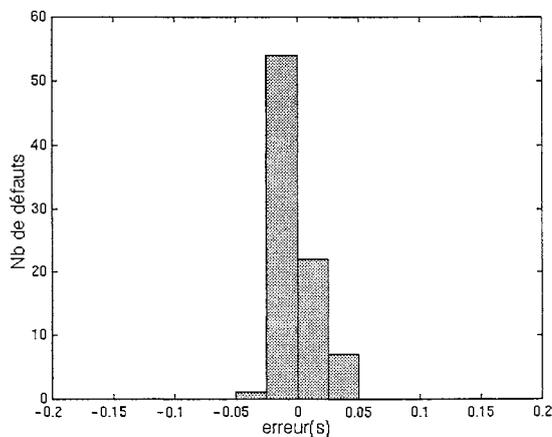
Erreur minimum = -0.008s Erreur maximum = +0.047s Nombre total de défauts : 65

Figure II-9 : Résultats des tests avec le réseau New-England



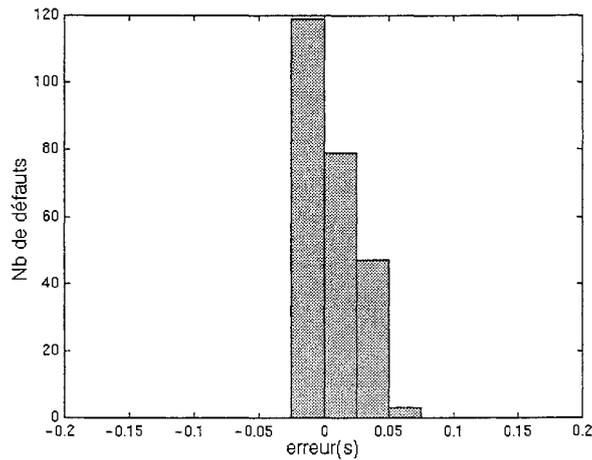
Erreur minimum = -0.074s Erreur maximum = +0.079s Nombre total de défauts : 122

Figure II-10 : Résultats des tests avec le réseau Iowa State



Erreur minimum = -0.027s Erreur maximum = +0.05s Nombre total de défauts : 84

Figure II-11 : Résultats des tests avec le réseau IEEE20



Erreur minimum = -0.019s Erreur maximum = +0.058s Nombre total de défauts : 248

Figure II-12 : Résultats des tests avec le réseau colombien

II.4.2 Analyse des résultats

Les estimations du TEC sont bonnes avec la méthode hybride FET, meilleures qu'avec la méthode PEBS et surtout qu'avec la méthode BCU. L'erreur maximum enregistrée est égale à 0.079s seulement.

Pourtant, les résultats ne sont pas si bons qu'il n'y paraît. Si l'erreur est aussi petite, c'est largement dû au fait que le TE est égal au TEC+0.1s. S'il avait été plus grand, l'erreur aurait été plus importante dans certains cas. Ceci est parfaitement illustré avec le défaut [127] [127-91] du réseau colombien. Avec la méthode PEBS, l'erreur est égale à +0.169s, alors qu'elle est égale à +0.058s avec la méthode hybride FET et TE=TEC+0.1s. Elle a donc considérablement diminué. Pourtant si on augmente le TE de 0.1s, elle devient égale à 0.107s. Et si on augmente encore le TE de 0.1s, elle passe à 0.169s. C'est-à-dire la même erreur qu'avec la méthode PEBS. L'erreur est donc fortement liée au TE.

Si la méthode hybride FET ne permet pas d'annuler l'erreur, elle la diminue tout de même nettement par rapport à la méthode PEBS. En effet, comme on ne recherche le TEC que si le réseau est instable dans le filtrage des contingences, et que le TE ne peut pas être beaucoup plus grand que le TEC car les dispositifs de protection réagissent très rapidement lorsqu'un court-circuit se produit (moins de 0,1s), le TE réel ne peut jamais être beaucoup plus grand que le TEC. Par conséquent, l'erreur dans le calcul du TEC n'est jamais très grande dans le cadre du filtrage.

Le fait que l'erreur soit limitée avec la méthode hybride FET ne signifie pas pour autant que cette méthode soit assez précise pour pouvoir classer correctement les contingences instables. En effet, une erreur de 0.06s par exemple est très importante si le TEC est inférieur à 0.1s. Par

conséquent, même si l'erreur ne dépasse pas 0.1s, un défaut fortement instable peut très bien être trouvé faiblement ou moyennement instable.

La méthode hybride FET, comme les méthodes PEBS et BCU, ne peut donc pas être utilisée pour le classement des contingences instables. Par contre, elle est très fiable dans la détermination de la stabilité du réseau grâce à l'utilisation de la simulation numérique complète de la trajectoire. Cependant, bien que cette méthode détermine plus rapidement la stabilité que la méthode BCU, elle demeure lente pour un filtrage en temps réel. En effet, il faut normalement entre 0.5 et 1s de simulation numérique pour connaître la stabilité du réseau sur la première oscillation. Cette durée est supérieure à la durée de simulation que nécessite la méthode PEBS. Avec cette méthode, moins de 0.6s de simulation suffise très souvent pour trouver le TEC d'un défaut.

II.5 ANALYSE DE LA METHODE HYBRIDE EEAC

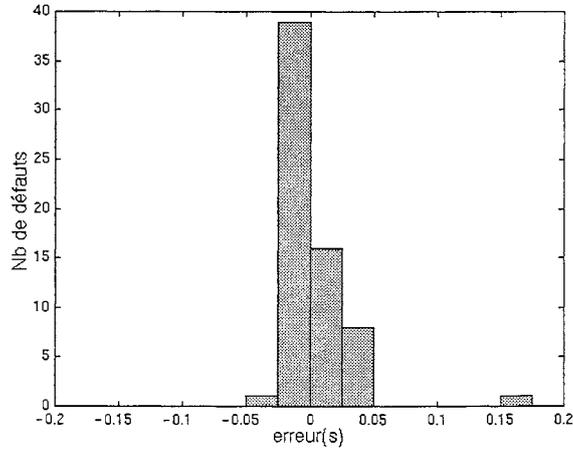
La méthode EEAC a fait l'objet de beaucoup d'intérêts ces dernières années. Elle est considérée comme une méthode capable d'estimer très rapidement le TEC. Son principe repose sur l'application du critère d'égalité des aires à un système équivalent d'une machine connectée à un noeud de puissance infinie. Cet indice est effectivement très rapide à calculer. Mais nous avons vu, dans le chapitre I, que la détermination du système équivalent nécessite une simulation complète de la trajectoire pour qu'elle soit correcte. Cette méthode n'est donc pas plus rapide que les méthodes FET. C'est aussi la raison pour laquelle nous l'avons appelé méthode hybride EEAC et non pas méthode EEAC.

La principale difficulté dans l'application de cette méthode est la décomposition des machines en deux groupes : un groupe de machines peu perturbées et un groupe de machines très perturbées. Nous avons utilisé dans les tests la trajectoire critique instable pour identifier ces deux groupes. La méthode hybride EEAC a donc été testée dans des conditions idéales car on ne connaît pas cette trajectoire lorsqu'on recherche le TEC. La procédure qui a été utilisée pour l'identification est la suivante :

1. Simulation avec $TE = TEC + 0.01s$ (temps d'élimination critique instable).
2. Détermination du point où la trajectoire sort du domaine de stabilité.
3. Classement des machines en prenant la valeur absolue des angles rotoriques au point de sortie. La machine qui a l'angle rotorique le plus grand en valeur absolue est considérée comme la machine la plus perturbée.
4. Application de la méthode EEAC. On constitue n-1 groupes critiques en prenant à chaque fois les n premières machines les plus perturbées (n étant le nombre de machines du réseau). Ainsi, le premier groupe critique est constitué de la machine la plus perturbée, le deuxième des deux machines les plus perturbées, etc. ... On calcule ensuite le TEC pour chacun des n-1 groupes critiques constitués.

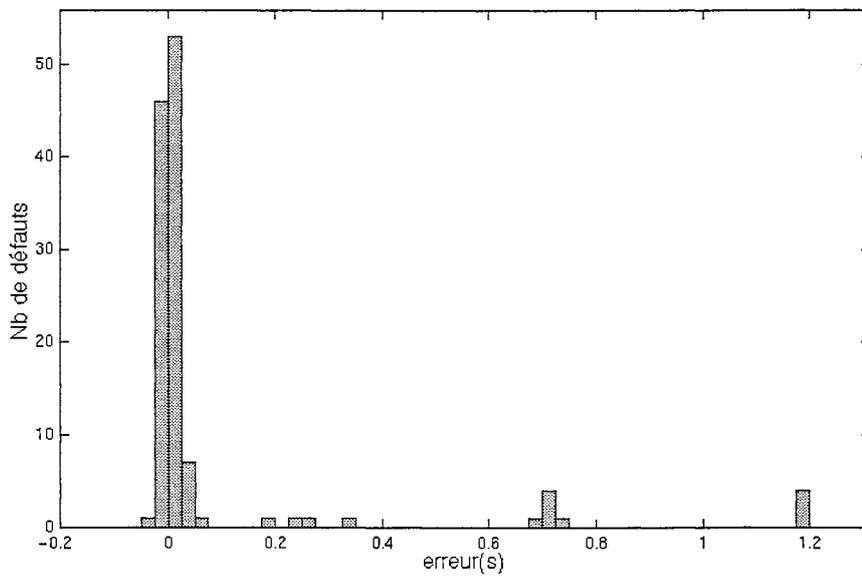
5. Le TEC réel est estimé égale au TEC minimum.

II.5.1 Résultats des tests



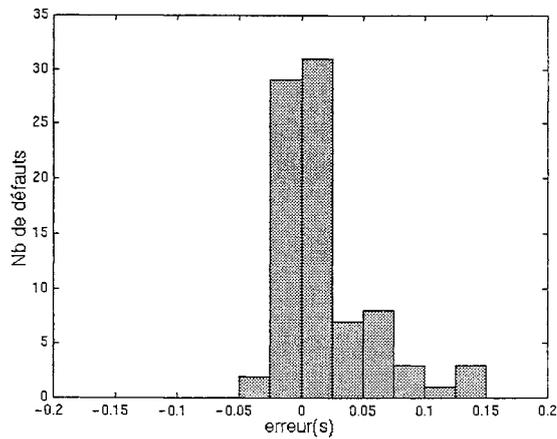
Erreur minimum = -0.043s Erreur maximum = +0.153s Nombre total de défauts : 65

Figure II-13 : Résultats des tests avec le réseau New-England



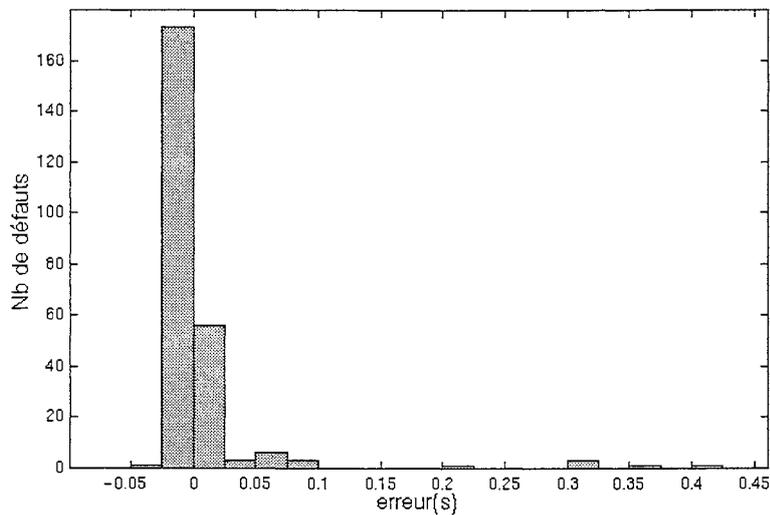
Erreur minimum = -0.025s Erreur maximum = +1.182s Nombre total de défauts : 122

Figure II-14 : Résultats des tests avec le réseau Iowa State



Erreur minimum = -0.036s Erreur maximum = +0.14s Nombre total de défauts : 84

Figure II-15 : Résultats des tests avec le réseau IEEE20



Erreur minimum = -0.026s Erreur maximum = +0.415s Nombre total de défauts : 248

Figure II-16 : Résultats des tests avec le réseau colombien

II.5.2 Analyse des résultats

La méthode hybride EEAC est plutôt précise puisque 98% des erreurs sont comprises entre -0.05s et 0.05s pour le réseau New-England, 88% pour le réseau Iowa State, 82% pour le réseau IEEE20 et 94% pour le réseau colombien.

Cependant, il existe aussi des erreurs qui sont très élevées (>0.1s). C'est le cas avec le défaut [3] [3-123] du réseau Iowa State. Le TEC estimé est égal à 1.459s, alors que le TEC réel est égal à 0.277s, ce qui représente une erreur de 1.182s. Cette erreur est énorme et tout à fait inacceptable pour l'analyse de la sécurité dynamique. Elle est due au fait que les machines ne peuvent pas se décomposer en deux groupes. Ceci est illustré par la figure II-17 qui représente les angles rotor pour le TE critique instable (TE=TEC+0.01s).

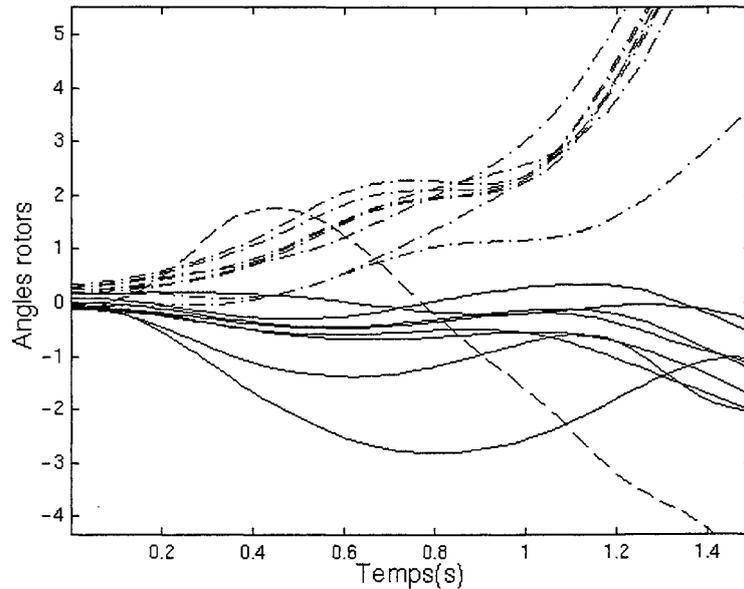


Figure II-17 : Angles rotoriques pour le défaut [3] [3-123] du réseau Iowa State

On voit sur cette figure que les machines se décomposent en trois groupes :

- un groupe fortement perturbé pendant le défaut mais qui est stable après son élimination. Ce groupe est composé d'une seule machine dont l'angle rotorique est représenté en pointillé.
- un groupe faiblement perturbé pendant le défaut mais qui devient instable après (angles rotoriques en trait mixte).
- un groupe faiblement perturbé pendant et après le défaut (angles rotoriques en trait plein).

Dans ce cas-là, la méthode hybride EEAC ne peut pas donner de bons résultats car les machines ne se décomposent pas en deux groupes. La raison pour laquelle il existe trois groupes de machines vient du fait que le réseau devient instable pour des problèmes d'oscillations inter-machines. En effet, les machines instables sont peu perturbées pendant le défaut, leur instabilité ne vient donc pas directement du défaut, mais elle a pour origine des oscillations inter-machines engendrées par ce défaut. Ce problème est traité en détail dans le chapitre III.

La présence d'oscillations inter-machines n'est pas la seule raison de l'échec de la méthode hybride EEAC. Comme le montre la figure II-18, l'origine de l'erreur peut être aussi due à un problème de stabilité transitoire. Cette figure représente les angles rotoriques pour le défaut [90] [90-91] du réseau IEEE20, avec le TE égal au temps d'élimination critique instable (TE=0.321s). On voit que deux machines perdent la stabilité mais aussi que le réseau se décompose en trois groupes de machines : une machine qui accélère, une machine qui décélère, et un ensemble de machines stables. La méthode hybride EEAC ne peut donc pas donner des

résultats précis. Effectivement, le TEC estimé avec la méthode hybride EEAC est supérieur de 0,081s au TEC réel du défaut (0.389s au lieu de 0.311s).

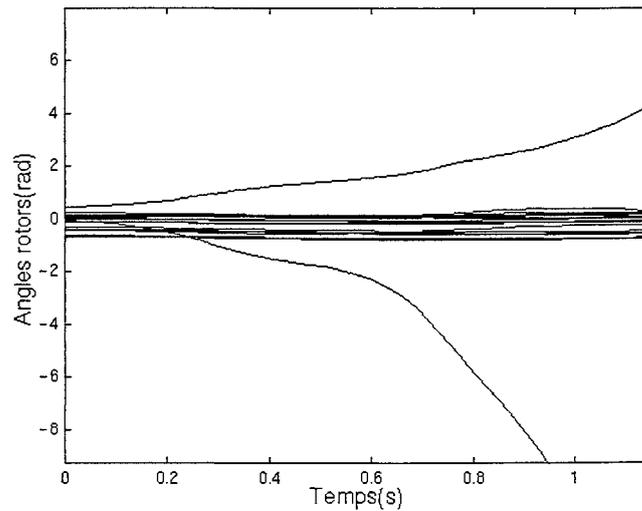


Figure II-18 : Angles rotoriques pour le défaut [90] [90-91] du réseau IEEE20

Lorsque la méthode hybride EEAC peut s'appliquer, elle fournit des résultats qui sont parfois meilleurs que ceux de la méthode hybride FET. Ce phénomène est bien mis en évidence avec le défaut [65] [65-38] du réseau IEEE20. Le TEC réel pour ce défaut est égal à 0.217s. Le TEC calculé avec la méthode hybride FET et $TE=TEC+0.2s$ est égal à 0.28s, alors que pour le même TE, il est égal à 0.22s avec la méthode hybride EEAC. La méthode hybride EEAC est donc bien plus précise.

La méthode hybride EEAC est par conséquent intéressante. Cependant, le fait qu'elle ne puisse pas être utilisée dans tous les cas de figure limite sérieusement ses possibilités d'application au filtrage des contingences. Du moins, elle ne peut pas être utilisée seule.

II.5.3 Etude de l'identification des machines critiques

Un autre problème se pose dans l'application de la méthode hybride EEAC. Il s'agit de l'identification des machines critiques. Cette identification a été réalisée idéalement dans les essais ci-dessus puisqu'on a utilisé la trajectoire critique instable. Or, cela n'est pas possible dans la réalité puisqu'on ne connaît pas le TEC.

Nous avons réalisé des essais supplémentaires qui ont montré que le groupe des machines critiques peut évoluer suivant le TE du défaut. Un TEC différent peut donc être obtenu en fonction de la valeur du TE. Le défaut [65] [65-38] du réseau IEEE20 en est une parfaite illustration. Le TEC estimé avec $TE=0.5s$ est égal à 0,301s, alors qu'il est égal à 0,22s avec $TE=0,3s$. Le TEC réel est lui égal à 0,217s. La différence entre les deux TEC estimés est conséquente puisqu'elle est égale à 0.081s. Cette différence est due à une identification différente des machines critiques. Pour $TE=0.5s$, le groupe des machines critiques est composé

des machines [2 3 4 5 7 8 9 16 18 20]. Alors que pour TE=0.3s, il est composé des machines [1 2 3 4 5 6 7 8 9 20]. Ce groupe évolue donc en fonction du TE.

Cependant, pour que l'identification des machines critiques soit mauvaise, il faut que le TE soit bien supérieur au TEC réel. Dans l'exemple ci-dessus, le TE doit être supérieur d'environ 0.3s au TEC réel pour que l'identification soit incorrecte. Normalement, cette condition n'est pas vérifiée dans le filtrage des contingences. En effet, comme l'on recherche le TEC que pour les cas où le réseau est instable, et que le TE réel ne peut jamais être très supérieur au TEC, étant donné que les appareils de protection éliminent très rapidement les courts-circuits (moins de 0.1s), il y a peu de chances pour que l'identification soit mauvaise dans le cadre du filtrage.

II.6 CONCLUSION

Nous avons dans ce chapitre testé plusieurs méthodes d'analyse de la stabilité transitoire afin de déterminer qu'elles sont les plus intéressantes pour le filtrage. De très nombreux essais ont été réalisés pour chacune de ces méthodes à l'aide de quatre réseaux tests de tailles différentes, dont trois réseaux standard souvent utilisés dans les études de stabilité transitoire (réseaux New-England, Iowa State et IEEE20).

Pour des raisons de clarté, les conclusions que nous avons tirées de cette étude sont récapitulées dans un tableau présenté ci-dessous.

	FIABILITE	RAPIDITE	PRECISION
méthode PEBS	++	+++	++
méthode BCU	+++	+	+
méthode hybride FET	++++	++	+++
méthode hybride EEAC	++++	++	+++
caractéristiques désirées	++++	++++	+++

Tableau II-1 : Tableau récapitulatif des tests réalisés

Les symboles utilisés dans ce tableau signifient :

++++ : très bonne

+++ : bonne

++ : moyenne

+ : mauvaise

On entend par fiabilité la capacité d'une méthode à déterminer correctement la stabilité du réseau pour un défaut donné.

Pour comparer la rapidité des différentes méthodes, nous avons pris en compte la quantité de calculs nécessaires pour trouver le TEC.

La précision concerne la précision du calcul du TEC.

Nous avons indiqué dans la dernière ligne du tableau les caractéristiques qu'une méthode doit avoir pour être utilisée dans le filtrage. Cette méthode doit être très rapide, car il s'agit de filtrer en temps réel, très fiable pour ne pas mettre le réseau en danger, et relativement précise pour que le classement des contingences instables par ordre de sévérité soit correct.

En observant ce tableau, on peut tout de suite remarquer qu'aucune méthode ne répond aux caractéristiques demandées. Cependant, il y a des méthodes plus intéressantes que d'autres.

La méthode BCU est sans conteste la plus mauvaise méthode. Elle est très lente, peu précise et pas assez fiable à cause des problèmes de convergences que l'on rencontre quelques fois.

La méthode PEBS est plus intéressante. C'est la méthode la plus rapide des quatre. Cependant, elle surestime parfois fortement le TEC, ce qui fait qu'elle n'est pas assez fiable et que sa précision est assez moyenne.

Les deux méthodes hybrides sont de loin les plus fiables, grâce à l'utilisation de la simulation numérique complète de la trajectoire pour déterminer la stabilité du réseau. Malheureusement, cette simulation numérique les rend aussi assez lentes. De plus, elles sont parfois imprécises, surtout la méthode hybride EEAC qui ne peut pas s'appliquer à tous les cas.

En fonction des résultats obtenus, nous avons donc choisi de développer deux types de méthodes : la méthode PEBS pour sa rapidité, et les méthodes hybrides pour leur fiabilité. Nous avons retenu la méthode hybride EEAC, malgré qu'elle ne puisse pas s'appliquer à tous les cas de figure, car elle peut être intéressante si elle est utilisée en combinaison avec la méthode hybride FET. En effet, on a vu qu'elle était parfois plus précise que la méthode hybride FET.

Dans la suite de ce rapport, nous nous attacherons donc à améliorer la fiabilité et la précision de la méthode PEBS, ainsi que la rapidité et la précision des méthodes hybrides, afin de mettre au point un filtrage efficace des contingences.

CHAPITRE III

APPLICATION DE LA METHODE PEBS A L'ANALYSE DE LA STABILITE TRANSITOIRE

CHAPITRE III

APPLICATION DE LA METHODE PEBS A L'ANALYSE DE LA STABILITE TRANSITOIRE

III.1 INTRODUCTION

Nous avons vu dans le chapitre précédent que la méthode PEBS est une méthode intéressante car elle est rapide. Cependant, elle surestime parfois fortement le TEC, comme nous l'avons vu lors des essais.

Dans ce chapitre, nous nous proposons d'améliorer la fiabilité de cette méthode. Nous allons d'abord identifier les causes de l'échec des méthodes FET. Dans cette étude, nous nous limiterons qu'aux méthodes PEBS et hybride FET car les autres méthodes FET ne sont pas intéressantes pour le filtrage. Ensuite, on abordera l'amélioration de la fiabilité de la méthode PEBS.

III.2 IDENTIFICATION DES CAUSES D'ERREURS RENCONTREES AVEC LES METHODES FET

Dans les essais des méthodes PEBS et hybride FET, nous avons vu que ces méthodes donnent parfois un TEC très supérieur au TEC réel. Ceci est d'autant plus vrai, pour la méthode hybride FET, que le TE est supérieur au TEC réel. Pour trouver les causes de cette surestimation, nous allons étudier un défaut où l'erreur est importante. Ce défaut est le court-circuit [100] [100-103] du réseau IEEE20. Le TEC de ce court-circuit est égal à 0.190s. L'erreur sur ce TEC est égale à 0.066 s avec la méthode PEBS, et à 0.05s avec la méthode hybride FET et le $TE=TEC+0.1s$.

Pour bien comprendre ce qui se passe, nous avons tracé sur la figure III-1 les angles rotoriques avec le court-circuit maintenu en permanence, et sur la figure III-2 les angles rotoriques pour le TE critique instable ($TE= TEC+0.01s$).

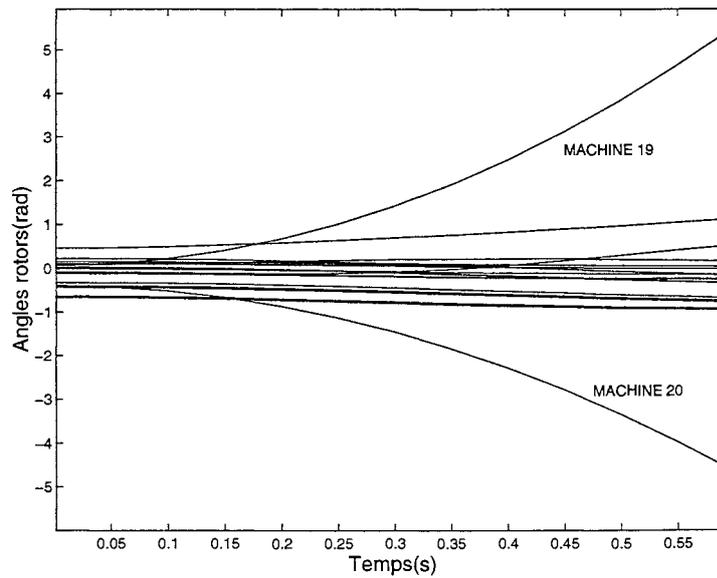


Figure III-1 : angles rotoriques avec le court-circuit maintenu en permanence

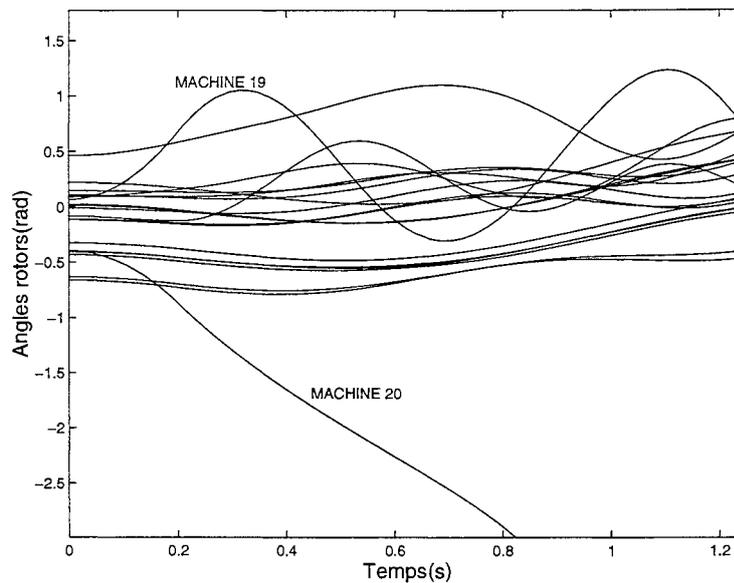


Figure III-2 : angles rotoriques pour le TE critique ment instable

Nous pouvons remarquer que les machines instables ne sont pas les mêmes dans les deux cas. Dans le premier cas, deux machines perdent la stabilité, alors que dans le deuxième cas, une seule machine devient instable. Il existe donc, parmi les deux machines perturbées pendant le défaut, une machine qui est plus stable que l'autre après l'élimination du défaut. Ceci est confirmé par le TE nécessaire pour déstabiliser ces deux machines. Le TE doit être égal à 0.191s pour que la machine 20 devienne instable, alors qu'il doit être égal à 0.333s pour que la machine 19 devienne à son tour instable. La machine 19 est donc beaucoup plus stable que la machine 20 dans la configuration post-défaut. Ceci entraîne un changement de direction de la trajectoire du système après l'élimination du court-circuit, comme le montre la figure III-3 Cette figure représente la trajectoire du système dans le plan des angles rotoriques des machines 19 et 20 pour le défaut maintenu en permanence, et pour le TE critique ment instable.

Nous n'avons pris en compte que les machines 19 et 20 car les autres machines n'interviennent pas dans la stabilité transitoire du réseau.

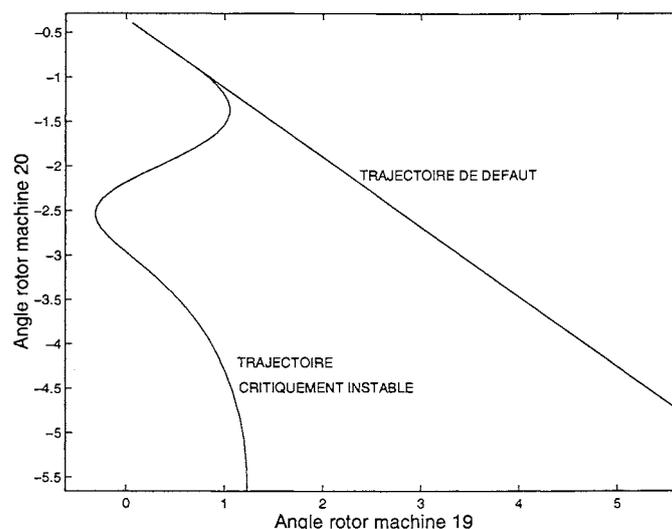


Figure III-3 : Trajectoires du système pour deux TE différents

Ce changement de direction se traduit par un point de sortie, du domaine de stabilité, différent dans les deux cas. Ce qui entraîne une estimation de l'énergie critique différente. Cette énergie est égale à 7.5pu lorsque le défaut est maintenu en permanence, et à 2.2pu pour le TE critiqueusement instable. La différence est importante et s'explique par la croissance plus rapide de l'énergie potentielle dans la direction de la trajectoire pendant le défaut que dans la direction de la trajectoire après le défaut. Pour bien montrer ce phénomène, nous avons tracé sur la figure III-4 la surface d'énergie potentielle ainsi que plusieurs trajectoires du système.

Normalement, la surface d'énergie potentielle ne peut pas être tracée en trois dimensions lorsque le système comprend plus de trois machines. L'énergie potentielle étant fonction des angles rotoriques (voir équation I-16), il faut donc moins de trois machines pour pouvoir tracer cette surface. Si on prend comme référence le centre d'inertie angulaire, ce qui est le cas ici, on peut encore tracer cette surface avec trois machines, étant donné que l'angle rotorique de la n ème machine dépend des angles rotoriques des autres machines. Dans le cas présent, nous avons pu tracer la surface d'énergie potentielle, bien que le réseau soit composé de 20 machines, car seules deux machines ont une influence sur l'énergie potentielle (E_p). En effet, les autres machines ne représentent qu'une faible proportion dans l' E_p totale. Nous avons donc pu tracer l' E_p en fonction des angles rotoriques des machines 19 et 20 en remplaçant les angles rotoriques des autres machines par leurs valeurs initiales. L' E_p ainsi calculée est une approximation de l' E_p réelle car aucune machine n'a une influence complètement nulle. De plus, l' E_p varie en fonction de la trajectoire du système (voir § I.3.3.1.c). En effet, deux points identiques peuvent donc avoir une E_p différente si les trajectoires ne sont pas les mêmes pour atteindre ce point. La relation algébrique donnant l' E_p n'est qu'une approximation utilisant l'hypothèse que la trajectoire est linéaire entre le PES post-défaut et le point où l'on calcule

l'Ep. Cette approximation peut donc donner des valeurs erronées si cette trajectoire est loin d'être linéaire. Mais malgré ces approximations, le tracé de la surface d'Ep permet de donner une bonne idée de ce qui se passe.

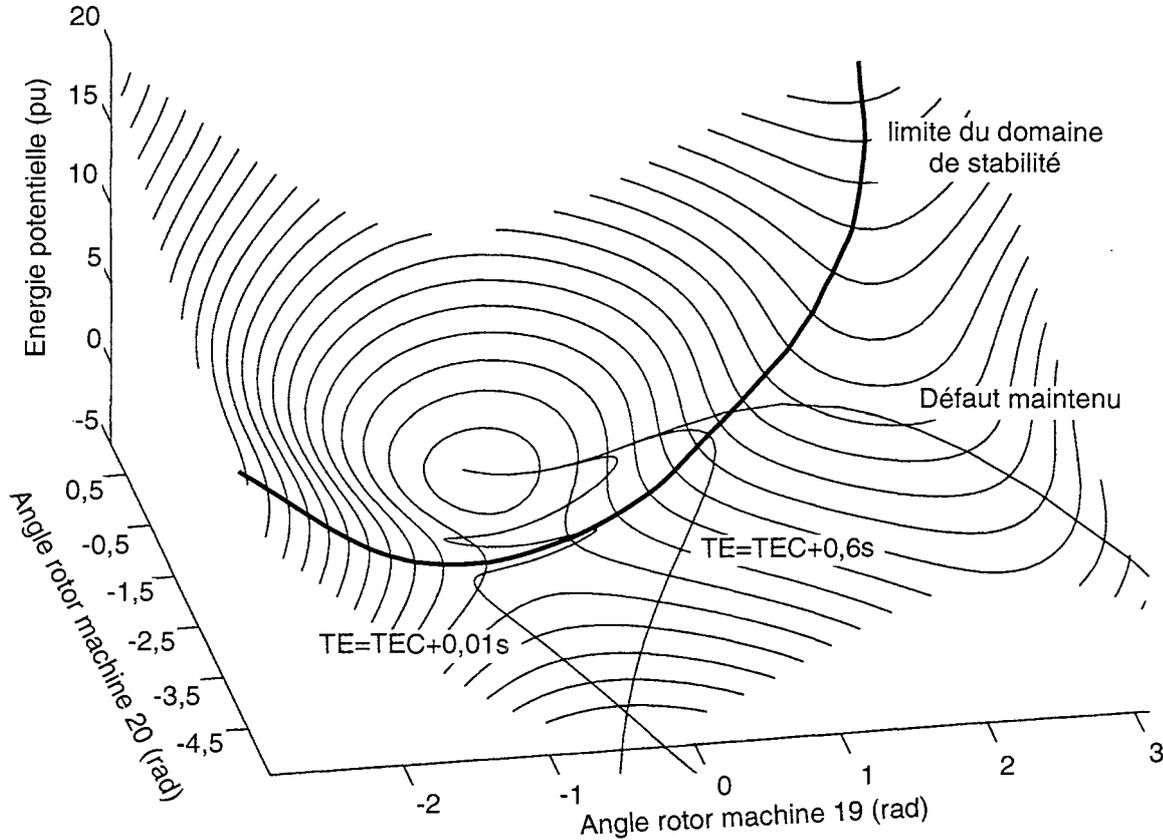


Figure III-4 : Surface d'énergie potentielle pour le défaut [100] [100-103]

Dans cette figure, nous avons tracé plusieurs trajectoires du système qui correspondent à des TE différents. Nous pouvons voir que le point de sortie du domaine de stabilité obtenu avec le défaut maintenu en permanence est très éloigné du point de sortie obtenu avec le TE critique instable ($TE=TEC+0.01s=0.2s$). L'énergie critique, qui est égale à l'Ep au point de sortie, n'a pas du tout la même valeur dans les deux cas (défaut maintenu en permanence et TE critique instable). Elle est égale à 7.5pu dans le premier cas, et à 2.2pu dans le deuxième cas. Cette différence est importante et explique pourquoi le TEC fourni par la méthode PEBS est fortement surestimé. La méthode PEBS échoue donc complètement dans la détermination du point de sortie.

En ce qui concerne la méthode itérative hybride FET, si on observe la trajectoire obtenue avec $TE=TEC+0.6s$, on se rend compte que l'estimation du point de sortie est encore mauvaise avec la méthode hybride FET. L'erreur est moins importante qu'avec la méthode PEBS, mais elle subsiste. Cette erreur sera d'autant plus importante que le TE est supérieur au TEC. Si on veut obtenir une bonne estimation de l'énergie critique, il est donc nécessaire que le TE soit

proche du TEC. Or, cette condition ne peut pas toujours être vérifiée puisqu'on recherche précisément le TEC. La prise en compte de la trajectoire post-défaut, avec la méthode hybride FET, ne permet donc pas de corriger complètement l'erreur enregistrée avec la méthode PEBS. C'est ce que nous avons déjà remarqué dans les essais de la méthode hybride FET dans le chapitre II.

Pour expliquer ce phénomène, nous avons réalisé des essais qui ont montré que la localisation correcte du point de sortie est impossible pour la plupart des défauts. La cause de ces échecs est le changement de direction de la trajectoire critique ment instable après l'élimination du défaut, comme dans l'exemple traité ci-dessus. Ce phénomène se produit chaque fois qu'il existe des machines perturbées plus stables que d'autres dans la configuration post-défaut, c'est-à-dire très souvent. En réalité, les méthodes PEBS et hybrides ne fonctionnent correctement que si une seule machine est perturbée pendant le défaut. Or, cette condition est loin d'être toujours vérifiée.

Jusqu'ici, nous avons raisonné en considérant que l'énergie critique était égale à l' E_p au point de sortie de la trajectoire critique ment instable. Ceci est l'application directe de la théorie basée sur la FET. Cependant, le changement de direction de la trajectoire après le défaut a une autre conséquence que la mauvaise détermination du point de sortie. Si on observe la figure III-4, on peut remarquer que l' E_p atteint un maximum avant que la trajectoire critique ment instable ($TE=TEC+0,01s$) sorte du domaine de stabilité. C'est ce que nous pouvons vérifier sur la figure III-5 qui représente l'évolution des énergies pour le TE critique ment instable ($TE=0.2s$). L' E_p atteint deux maximum avant que le système sorte du domaine à $t=0.79s$. L' E_p au point de sortie (2.2 pu) est donc inférieure à l' E_p maximum (3.1 pu).

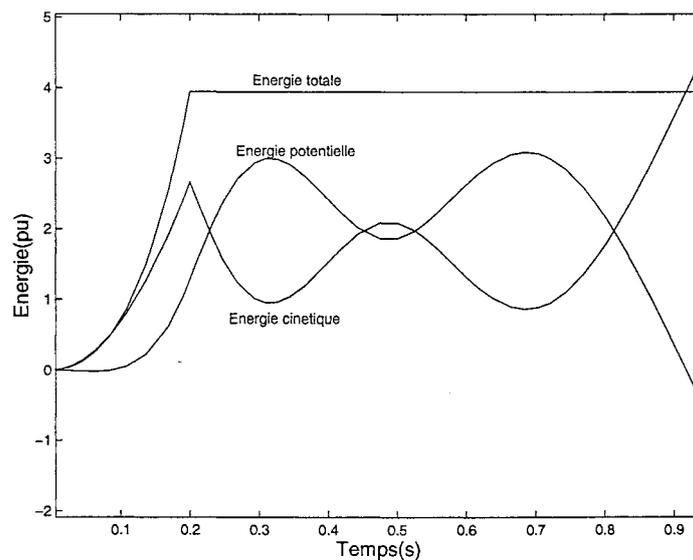


Figure III-5 : Evolution des énergies pour le TE critique ment instable

Si on se réfère à la définition de l'énergie critique, l'énergie critique correspond à l'énergie potentielle maximum que peut contenir le réseau. La véritable énergie critique, dans le cas

présent, n'est donc pas égale à l' E_p au point de sortie, mais à l' E_p maximum le long de la trajectoire. La technique qui consiste à prendre l' E_p au point de sortie pour calculer l'énergie critique n'est donc pas valable dans le cas présent. En fait, cette technique ne peut être utilisée que si la trajectoire ne change pas de direction après l'élimination du défaut, ce qui est rarement le cas comme nous l'avons vu.

La figure III-5 permet de pointer un autre problème dans le calcul du TEC à partir de la FET. Bien que le TE soit égal au TE critiquelement instable, l'énergie cinétique est loin de s'annuler, et l' E_p maximum est loin d'être égale à l'énergie totale. Ceci signifie que l'énergie critique, égale à l' E_p maximum, ne correspond pas à l'énergie totale injectée dans le réseau pendant le défaut. Autrement dit, cette énergie totale n'est pas convertie totalement en énergie potentielle après l'élimination du défaut, contrairement à la théorie. Ceci est confirmé avec la figure III-6 qui représente les différentes énergies pour la TE critiquelement stable ($TE=0.190s$).

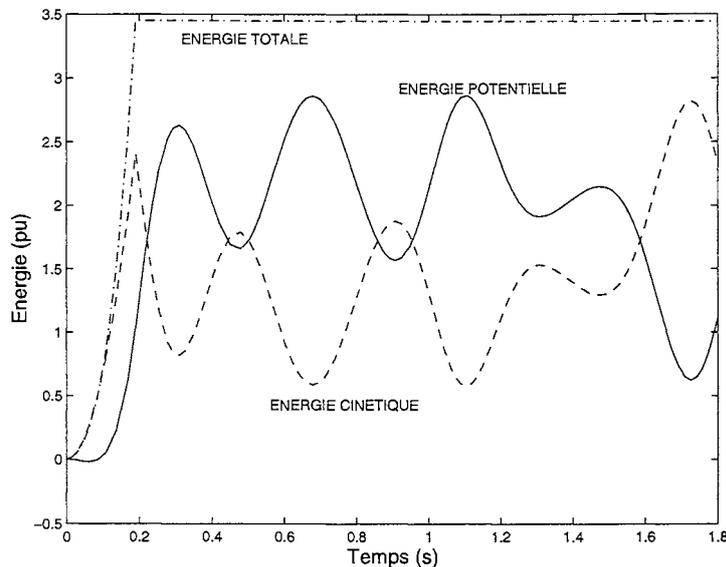


Figure III-6. : Evolution des énergies pour le TE critiquelement stable

On vérifie effectivement sur cette figure que l'énergie totale n'est pas complètement transformée en énergie potentielle, malgré la stabilité du réseau. Ceci pose un problème pour l'estimation du TEC. En effet, l'énergie critique, qui est sensée être égale à l' E_p maximum que peut contenir le réseau, est inférieure à l'énergie totale qu'il faut injecter pour que le réseau devienne instable. Dans le cas présent, l'énergie nécessaire pour déstabiliser le réseau est égale à 3.5 pu, alors que l'énergie critique est égale à 2.9 pu. Cette différence n'est pas négligeable et entraîne une sous-estimation du TEC. Le TEC obtenu à partir de l'énergie critique est égal à 0.178s, alors que le TEC réel est égal à 0.191s. Ce phénomène explique en partie pourquoi les méthodes PEBS et hybride FET donnent des résultats parfois conservatifs. Toutefois, ce problème n'est pas très important car il entraîne une sous-estimation du TEC, et non pas une surestimation. De plus, l'erreur n'est jamais très importante, l'énergie critique ne pouvant jamais être très inférieure à l'énergie totale nécessaire pour déstabiliser le réseau.

L'analyse de l'imprécision des méthodes PEBS et hybride FET a permis de montrer que ces méthodes ne sont pas fiables dans la détermination de l'énergie critique. Elles devraient donc normalement fournir de mauvais résultats. Or, nous avons vu dans le chapitre II que ces méthodes sont plutôt précises. En fait, cette précision est due à trois phénomènes qui sont détaillés ci-dessous :

- S'il est vrai que dans la plupart des cas, la localisation du point de sortie de la trajectoire critique ment instable est mauvaise. Cela ne veut pas dire, pour autant, que l'erreur sur l'énergie critique est importante. L'erreur dépend de la forme de la surface d'énergie potentielle. Si la croissance de l'Ep est de même grandeur dans la direction de défaut et dans la direction post-défaut, l'erreur sur l'énergie critique est peu importante.
- Si on compare l'erreur sur l'énergie critique et l'erreur sur le TEC, on observe que l'erreur sur le TEC est beaucoup plus faible. Avec le défaut étudié ci-dessus, l'énergie critique est surestimée de 142% avec la méthode PEBS (7.5 pu au lieu de 2.2 pu), alors que le TEC est seulement surestimé de 35% (0.256s au lieu de 0.190s). L'erreur est donc fortement diminuée. Cette diminution est due à la caractéristique de l'énergie injectée pendant le défaut dans le réseau. Comme le montre la figure III-7 qui représente l'évolution de l'énergie totale lorsque le défaut est maintenu en permanence, l'énergie totale croît très peu dans un premier temps, pour ensuite augmenter très rapidement. Ce phénomène est dû à l'inertie des générateurs. En effet, l'énergie totale pendant le défaut est quasiment égale à l'énergie cinétique comme le montre les figures III-5 et III-6. La croissance rapide de l'énergie totale explique pourquoi l'erreur sur l'énergie critique se répercute peu dans le calcul du TEC. En effet, si l'énergie critique se situe dans la partie de la caractéristique où l'énergie totale augmente rapidement, une erreur sur l'énergie critique a peu d'influence sur le TEC. Ceci est le cas avec le défaut étudié. L'énergie critique étant égale à 3.1pu, elle se situe dans la partie de la caractéristique où l'énergie totale augmente rapidement. Normalement, cette condition est toujours vérifiée. Cela explique en grande partie la précision inattendue des méthodes PEBS et hybride FET.

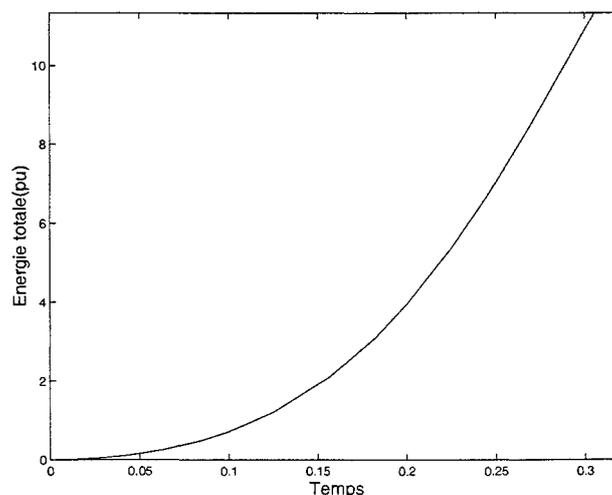


Figure III-7 : Evolution de l'énergie totale injectée dans le réseau pendant le défaut

- Nous avons vu précédemment que l'énergie totale injectée dans le réseau ne se transforme pas complètement en E_p après l'élimination du défaut. Ceci entraîne une sous-estimation du TEC qui permet de corriger en partie la surestimation de l'énergie critique. Généralement, cette sous-estimation du TEC est faible. Elle contribue donc assez peu à rendre les méthodes PEBS et hybride plus précises. Nous avons tout de même trouvé un défaut, lors des tests de la méthode PEBS, pour lequel le TEC est fortement sous-estimé. Il s'agit du défaut [84] [84-41] du réseau Iowa State. La méthode PEBS trouve ce défaut toujours instable ($TEC=0s$), alors que le TEC réel de ce défaut est égal à 0.116s. Cette erreur a deux origines : Premièrement, l'énergie critique estimée est inférieure à l'énergie totale nécessaire pour déstabiliser le réseau puisqu'elle est égale à $-0.14pu$ (l'énergie critique est négative car les E_p sont calculées dans cet exemple par rapport au point d'équilibre stable avant défaut, et non par rapport au point d'équilibre stable après défaut. Si cela avait été le cas, l'énergie critique aurait été positive), alors que l'énergie totale est égale à 0.18pu. La différence est faible. L'erreur sur le TEC ne devrait donc pas être trop importante. Cependant, comme la valeur de l'énergie critique est très faible, elle se situe dans la partie de la courbe où l'énergie totale croît très lentement pendant le défaut. L'erreur sur l'énergie critique se répercute donc fortement sur le TEC. Ce qui explique que la sous-estimation soit aussi importante. Ce défaut est le seul défaut que nous ayons trouvé où la méthode PEBS sous-estime fortement le TEC. A part ce défaut, l'erreur n'est jamais inférieure à -0.039s.

Nous avons analysé ci-dessus les trois raisons qui font que les méthodes PEBS et hybride sont précises dans beaucoup de cas. Néanmoins, malgré ces trois facteurs correcteurs, ces méthodes peuvent fortement surestimer le TEC si l'erreur sur l'énergie critique est trop importante, comme nous l'avons vu dans le chapitre II. Ces méthodes ont donc une mauvaise précision dans certains cas. Ceci est embêtant car non seulement elles ne peuvent pas être utilisées pour classer les contingences instables, mais en plus, la méthode PEBS n'est pas assez fiable pour déterminer la stabilité du réseau. En effet, des défauts instables peuvent être trouvés stables si l'erreur est importante. Si on veut pouvoir utiliser ces deux méthodes dans le filtrage des contingences, il faut donc améliorer leurs précisions.

Il existe une autre cause pour laquelle les méthodes FET sont imprécises. Dans certains cas, il se peut que les machines instables soient des machines très peu perturbées pendant le défaut, alors que les machines perturbées par le défaut sont stables. Ce type d'instabilité est montré dans la figure III-8. Cette figure représente l'évolution des angles rotoriques pour le défaut [3] [3-125] du réseau Iowa State. Le TEC réel pour ce défaut est égal à 0.259s, alors que le TEC estimé par la méthode PEBS est égal à 0.337s, soit une erreur de 0.078s. Les angles rotoriques tracés sur cette figure ont été obtenus avec le TE critique instable ($TE=TEC+0.01s=0.269s$).

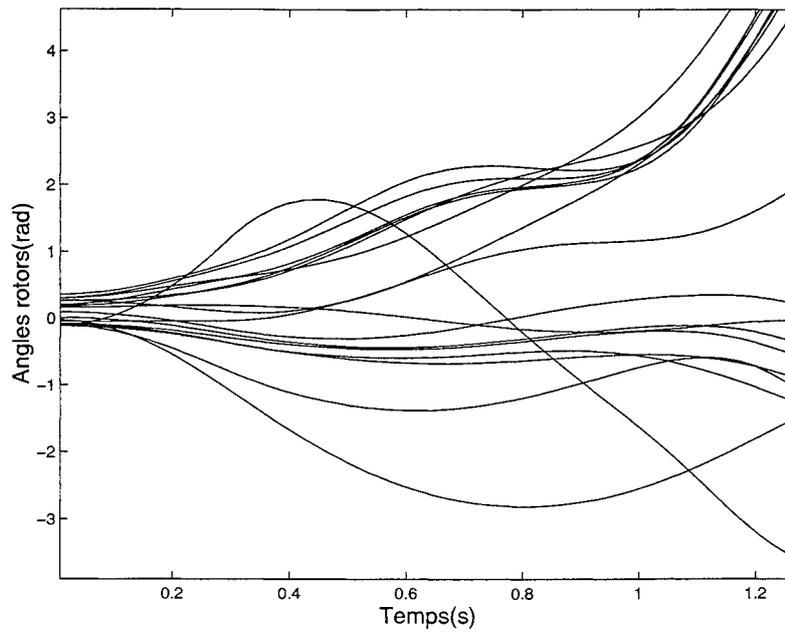


Figure III-8 : Evolution des angles rotoriques dans le cas d'une perte de stabilité dynamique

On voit bien sur cette figure que les générateurs qui perdent la stabilité sur la première oscillation sont peu perturbés pendant le défaut. Leurs angles rotoriques évoluent très peu pendant cette période (entre 0 et 0.269s). Il y a donc très peu d'énergie injectée dans ces machines. Par conséquent, elles ne perdent pas la stabilité directement à cause du court-circuit, mais à cause des oscillations inter-machines que le court-circuit engendre. Le court-circuit excite des modes d'oscillations inter-machines qui sont faiblement amortis, et qui entraînent une perte de stabilité du réseau.

Les méthodes FET ne peuvent pas donner de bons résultats dans ces cas-là, comme toutes les autres méthodes d'analyse de la stabilité transitoire. Il est donc nécessaire, avant de débiter une analyse de la stabilité transitoire, de s'assurer qu'il n'y a pas de modes d'oscillations inter-machines instables ou proches de l'instabilité dans le réseau. Sinon, une estimation correcte du TEC ne sera pas toujours possible, même si la méthode d'analyse de la stabilité transitoire est une bonne méthode.

Cependant, il est nécessaire de relativiser ce problème. Dans l'exemple ci-dessous, si ce sont des machines peu perturbées pendant le défaut qui perdent la stabilité, c'est avant tout parce que les machines perturbées sont très stables. Si elles avaient été beaucoup moins stables, elles auraient perdu la stabilité en premier. Les problèmes de stabilité transitoire l'auraient emporté sur les oscillations inter-machines, et le TEC aurait été estimé correctement. Il faut que des modes d'oscillations inter-machines soient très peu amortis pour que la perte de stabilité ne soit pas d'origine transitoire lorsque le TEC est inférieur à 0.1s. La vérification de la stabilité de tous les modes d'oscillations inter-machines, avant d'étudier la stabilité transitoire, est donc suffisante pour éviter que ce problème ne se produise.

III.3 AMELIORATION DE LA METHODE PEBS

Nous nous proposons maintenant d'améliorer la fiabilité de la méthode PEBS. La fiabilité est la capacité d'une méthode à déterminer correctement la stabilité du réseau. Il ne faut pas qu'un défaut instable puisse être considéré stable. Or, cette condition n'est pas toujours vérifiée avec la méthode PEBS puisqu'elle surestime parfois fortement le TEC ($>0.1s$), comme nous l'avons vu dans le chapitre II lors du test de cette méthode.

Nous avons vu précédemment que cette surestimation était due à un changement de direction de la trajectoire après l'élimination du défaut. Lorsque ce phénomène se produit, la détermination de l'énergie critique est impossible à effectuer correctement puisque l'énergie potentielle maximum de la trajectoire critique instable est impossible à calculer. Il faut donc utiliser une autre approche pour calculer le TEC à partir de la trajectoire de défaut.

III.3.1 Principe

Nous pouvons voir, dans la figure III-4, que l'Ep croît plus rapidement dans la direction de la machine 19 que dans la direction de la machine 20. Ceci signifie que l'Ep de la machine 19 est plus importante que l'Ep de la machine 20. Ceci est confirmé par la figure III-9 qui représente les Ep des différentes machines pour la trajectoire de défaut. Ces Ep ont été calculées grâce à la FET individuelle (voir équation I-10).

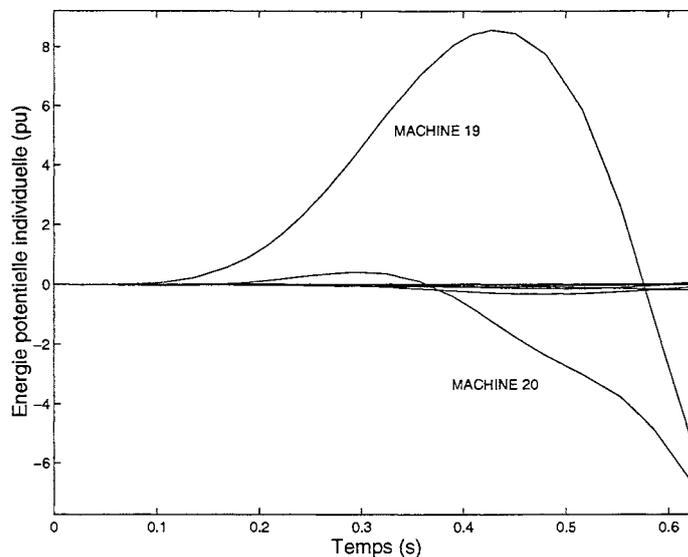


Figure III-9 : Energies potentielles des différentes machines

Nous voyons sur cette figure que l'Ep de la machine 19 est beaucoup plus importante que l'Ep de la machine 20. L'Ep de la machine 19 représente donc une grande partie de l'Ep totale du réseau. Lorsqu'on calcule le TEC à partir de l'Ep totale, on prend donc surtout en compte la stabilité de la machine 19, et peu celle de la machine 20. Ceci ne serait pas très grave si la machine 19 était la plus instable, mais ce n'est pas le cas. Nous avons vu dans la figure III-2

que cette machine est beaucoup plus stable que la machine 20. Ceci explique donc la surestimation importante du TEC avec la méthode PEBS dans ce cas.

L'utilisation de l'Ep totale pour calculer l'énergie critique n'est donc pas une bonne technique. Elle ne permet pas de prendre en compte la stabilité de chaque machine. Pour résoudre ce problème, il faut calculer le TEC relatif à chacune des machines perturbées pendant le défaut, et ensuite prendre le TEC minimum. Ces TEC, que l'on appellera par la suite TEC individuel, se calculent de la même façon que le TEC global. Le TEC relatif à une machine correspond à la durée du défaut pour laquelle l'énergie totale injectée dans la machine devient égale à l'énergie critique de cette machine. L'énergie critique de la machine correspondant à l'Ep maximum que cette machine peut contenir.

Si on applique cette méthode, que l'on appellera par la suite méthode PEBS individuelle, au défaut étudié, on trouve un TEC individuel égal à 0.307s pour la machine 19, et à 0.140s pour la machine 20. On vérifie bien que la machine 20 est beaucoup plus instable que la machine 19. Si on prend le TEC estimé égal au TEC individuel minimum, il devient égal à 0.140s. Soit 0.05s de moins que le TEC réel. Le TEC est donc maintenant sous-estimé. Ce qui est très important pour la fiabilité de la méthode PEBS. L'origine de cette sous-estimation vient du fait que la trajectoire de défaut est différente de la trajectoire critique ment instable. L'énergie critique de la machine 20 est donc sous-estimée avec la trajectoire de défaut. L'énergie potentielle maximum sur cette trajectoire est égale à 0.42pu, alors que sur la trajectoire critique ment instable elle est égale à 0,88pu.

Cette nouvelle méthode PEBS étudie donc la stabilité de chaque machine perturbée. Et non plus la stabilité globale du système. Elle prend ainsi mieux en compte l'influence de chaque machine dans la stabilité du réseau. On évite en particulier que les machines qui emmagasinent beaucoup d'Ep aient une influence trop importante dans le calcul du TEC, ce phénomène étant à l'origine des grandes erreurs enregistrées avec la méthode PEBS.

III.3.2 Mise en œuvre de la méthode PEBS individuelle

L'exemple traité ci-dessus est un cas idéal puisque la détermination des machines perturbées est évidente. En effet, il existe deux machines très perturbées et un groupe de machines non perturbées. Ceci n'est pas toujours le cas, des machines peuvent être faiblement, ou moyennement perturbées, et il est alors difficile de savoir s'il faut les prendre en compte dans le calcul du TEC.

La méthode la plus simple serait de considérer toutes les machines, mêmes celles non perturbées. Ainsi, on serait sûr de ne pas surestimer le TEC. Cependant, nous avons effectué des essais avec cette stratégie qui nous ont montré que les TEC individuels, relatifs aux machines non perturbées, pouvaient être très imprécis car les énergies en jeu (énergie critique, énergie totale, ...) sont très faibles. Une erreur sur l'énergie critique peut donc se répercuter fortement sur le TEC individuel.

Il est donc nécessaire de ne considérer que les machines perturbées. Pour sélectionner ces machines, nous avons utilisé l'énergie cinétique individuelle. Cette grandeur est une bonne mesure de la perturbation d'une machine par un défaut. En effet, l'énergie cinétique individuelle, au moment de l'élimination du défaut, correspond à l'énergie qui devra être transformée en énergie potentielle pendant la période post-défaut.

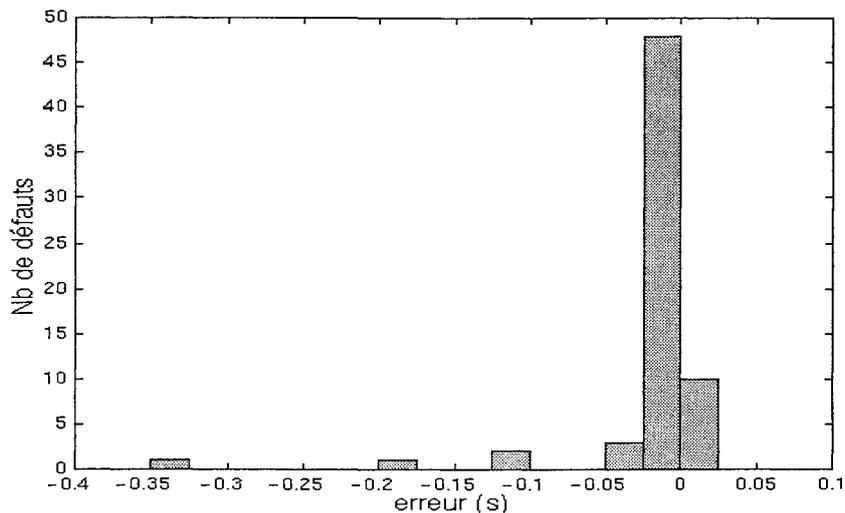
Pour sélectionner les machines perturbées, nous avons donc utilisé la procédure suivante :

1. On simule la trajectoire de défaut jusqu'à $t=0.35s$.
2. On calcule l'énergie cinétique individuelle pour chacune des machines à $t=0.35s$.
3. On classe les machines selon leur degré d'instabilité. La machine la plus instable est celle qui a l'énergie cinétique individuelle la plus élevée.
4. On sélectionne les générateurs dont on devra calculer le TEC individuel. Pour cela, on prend toutes les machines pour lesquelles $E_{ci_ind} > \kappa \cdot \max(E_{ci_ind})$, avec E_{ci_ind} = Energie cinétique individuelle. κ est un coefficient de pondération qui permet de ne retenir que les machines perturbées par le défaut. Sa valeur est fixée en fonction des machines que l'on veut prendre en compte. Plus on veut sélectionner des machines peu perturbées, plus sa valeur sera faible.

Cette procédure permet de retenir tous les générateurs qui sont fortement ou moyennement perturbés par le défaut. On évite ainsi que le TEC soit fortement surestimé.

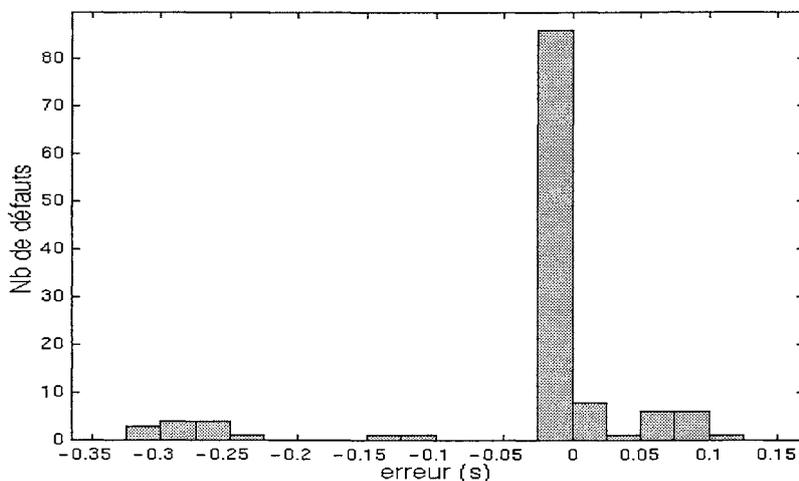
III.3.3 Test de la méthode PEB \cap individuelle

Pour montrer l'efficacité de cette méthode, nous l'avons validée sur les quatre réseaux tests. Les conditions d'essais sont les mêmes que celles utilisées pour les essais de la méthode PEBS dans le chapitre II. Nous avons pris un coefficient κ égal à 0.25 pour la sélection des machines perturbées. Cette valeur permet de prendre en compte les générateurs qui sont moyennement ou fortement perturbés. Les résultats sont montrés ci-dessous sous forme d'histogramme.



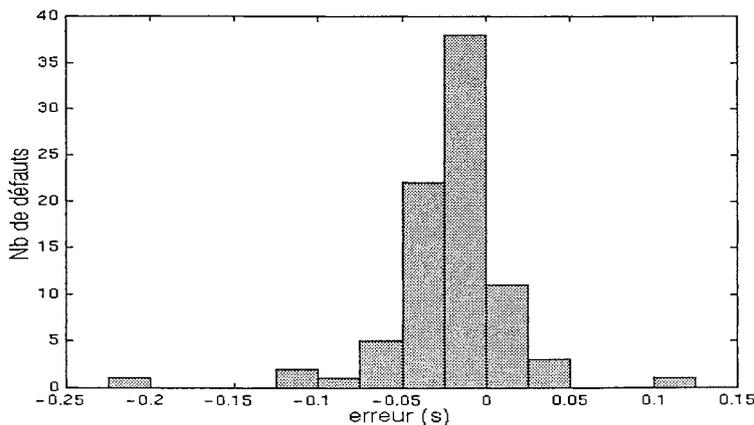
erreur minimum = -0.326s erreur maximum = +0.022s Nombre total de défauts : 65

Figure III-10 : Résultats des tests avec le réseau New-England



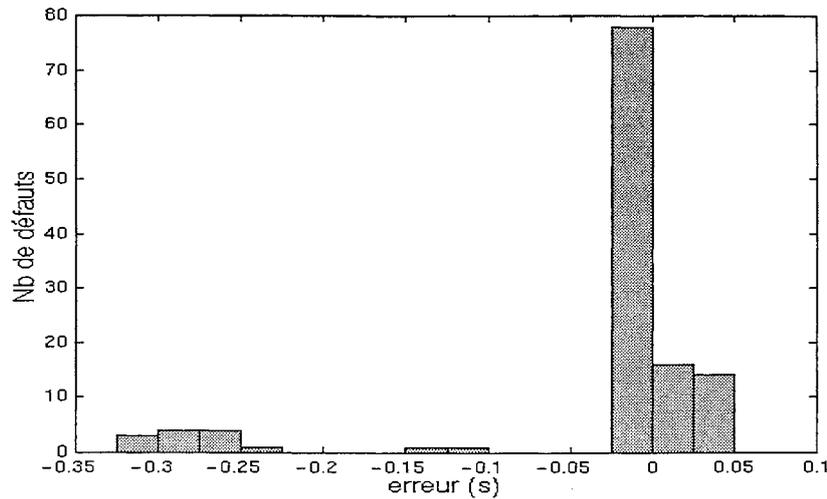
erreur minimum = -0.312s erreur maximum = +0.104s Nombre total de défauts : 122

Figure III-11 : Résultats des tests avec le réseau Iowa State



erreur minimum = -0.221s erreur maximum = +0.125s Nombre total de défauts : 84

Figure III-12 : Résultats des tests avec le réseau IEEE20



erreur minimum = -0.300s erreur maximum = +0.030s Nombre total de défauts : 240

Figure III-13 : Résultats des tests avec le réseau colombien

III.3.4 Analyse des résultats

L'estimation du TEC est très bonne dans la plupart des cas. La grande majorité des erreurs sont comprises entre -0.05s et +0.05s (94% des cas avec le réseau New-England, 78% avec le réseau Iowa State, 83% avec le réseau IEEE20, et 84% avec le réseau colombien).

Pour les réseaux New-England et colombien, le TEC est peu surestimé. L'erreur ne dépasse pas 0.03s. Par contre, il y a des défauts pour lesquels le TEC est fortement surestimé avec les réseaux IEEE20 et Iowa State. L'erreur maximum étant égale à 0.104s. Ces erreurs sont dues à la présence d'oscillations inter-machines faiblement amorties. Ce problème a déjà été rencontré et traité précédemment (voir § III.2). Dans ce cas-là, les machines les plus instables après l'élimination du défaut sont des machines qui sont faiblement perturbées pendant le défaut. Bien évidemment, la méthode PEBS individuelle ne prend pas en compte ces machines. Mais, même si ces machines étaient prises en compte, les TEC individuels relatifs à ces machines ne seraient pas corrects car la trajectoire post-défaut de ces machines est éloignée de la trajectoire de défaut. La méthode PEBS individuelle, comme les autres méthodes d'analyse de la stabilité transitoire, ne permet donc pas de traiter ce type d'instabilité. Il faut s'assurer que les modes d'oscillations inter-machines sont stables avant de réaliser l'analyse de la stabilité transitoire pour obtenir des résultats corrects avec la méthode PEBS individuelle.

Si on excepte les défauts pour lesquels il y a une perte de stabilité due à des oscillations inter-machines, la surestimation du TEC ne dépasse pas 0.022s pour le réseau New-England, 0.014s pour le réseau Iowa State, 0.065s pour le réseau IEEE20, et 0.03s pour le réseau colombien. La méthode PEBS individuelle surestime donc peu le TEC. C'est donc une méthode très fiable pour déterminer la stabilité du réseau. Par conséquent, elle peut être utilisée pour le filtrage des contingences. Il suffit de prendre une marge d'erreur égale à 0.075s par exemple, afin de s'assurer qu'aucun défaut instable ne puisse être considéré stable. Avec cette stratégie, toutes

les contingences dont le TEC est estimé supérieur au TE réel + 0.075s sont écartées, et ne feront pas l'objet d'études plus détaillées.

Si la méthode PEBS individuelle surestime très peu le TEC, elle le sous-estime parfois beaucoup. Ceci est dû au fait que le TEC individuel est parfois très sous-estimé pour certaines machines. Cette erreur a évidemment pour origine une mauvaise détermination de l'énergie critique de ces machines avec la trajectoire de défaut. Ceci est illustré avec la figure III-14 qui représente l'énergie potentielle individuelle obtenue avec la trajectoire de défaut et avec la trajectoire critique ment instable pour une machine où le TEC individuel est très sous-estimé. Ces courbes ont été calculées avec le défaut [37] [37-38] du réseau IEEE20, et pour la machine 9. L'énergie critique individuelle de cette machine est égale à 0.025 pu avec la trajectoire de défaut, alors qu'elle est égale à 0.5 pu avec la trajectoire critique ment instable. Cette différence entraîne une erreur importante sur le TEC individuel puisqu'il est estimé égal à 0.018s avec la trajectoire de défaut, alors qu'il est en réalité égal à 0.239s. Dans le cas étudié ci-dessus, l'énergie critique individuelle est trouvée légèrement positive, mais il existe des cas où elle est trouvée négative, alors que l'énergie critique individuelle réelle est positive. On a rencontré aussi d'autres cas où l'énergie potentielle individuelle ne fait que décroître. Le TEC est donc considéré nul pour ces défauts alors qu'il est en réalité bien supérieur à 0s. Ces cas, où l'énergie potentielle individuelle ne fait que décroître pour certaines machines, sont responsables de la plupart des fortes sous-estimations du TEC.

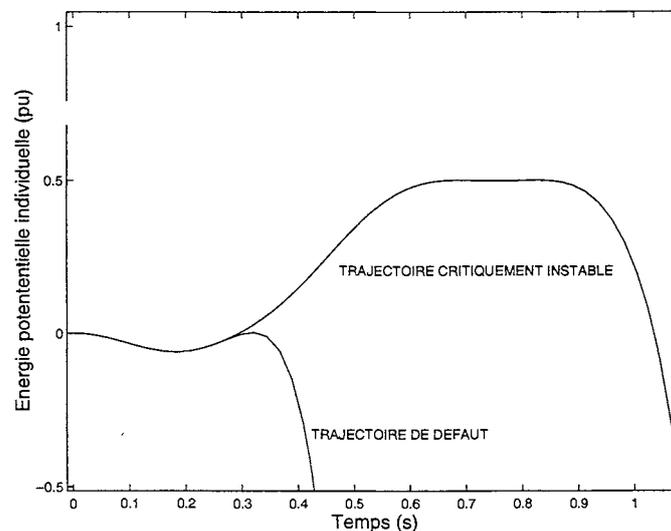


Figure III-14 : Energies potentielles individuelles de la machine 9 pour le défaut [37] [37-38] du réseau IEEE20

Le TEC peut donc être parfois très sous-estimé. Par conséquent, la méthode PEBS individuelle n'est pas assez précise pour être utilisée dans le classement par ordre de sévérité des contingences instables. Par contre, elle peut être employée pour déterminer la stabilité des réseaux puisqu'elle surestime peu le TEC. Pour être sûr qu'aucun défaut instable ne puisse être considéré stable, il suffit de prendre une marge d'erreur égale à 0.075s par exemple.

Cependant, il ne doit pas y avoir trop de TEC fortement sous-estimés, sinon trop de contingences stables ne peuvent pas être écartées avec la méthode PEBS individuelle et doivent faire l'objet d'une étude supplémentaire. Le filtrage est alors inefficace. Dans les essais réalisés ci-dessus, nous avons trouvé peu de défauts pour lesquels le TEC est très sous-estimé ($< 0,1s$): 6% des cas avec le réseau New-England, 11% avec le réseau Iowa State, 4% avec le réseau IEEE20 et 14% avec le réseau Colombien. Ce qui laisse penser que la méthode PEBS individuelle est efficace pour la détermination de la stabilité du réseau.

III.3.5 Accélération de la méthode PEBS individuelle

L'intérêt de la méthode PEBS est sa rapidité. Elle demande moins de calculs que les autres méthodes FET car la simulation numérique s'effectue avec le défaut maintenu en permanence, et elle est arrêtée dès que la trajectoire du système sort du domaine de stabilité. Comme le défaut est maintenu, cette trajectoire sort rapidement du domaine de stabilité. De plus, la trajectoire est relativement linéaire car l'accélération des machines est à peu près constante pendant le défaut, ce qui permet d'utiliser de grands pas d'intégrations.

En ce qui concerne la méthode PEBS individuelle, le même raisonnement peut être tenu. Si on observe la figure III-9, on remarque que les E_p des deux machines perturbées atteignent un maximum à des instants différents : 0.299s pour la machine 20, 0.449s pour la machine 19. La simulation numérique peut donc être arrêtée au bout de 0.449s. Ce qui est plus rapide qu'une simulation complète qui nécessite en moyenne 0.5s à 0.8s de temps d'intégration.

Cependant, cette simulation peut encore être arrêtée beaucoup plus rapidement. En effet, le calcul précis du TEC n'est pas obligatoire si on utilise cette méthode seulement pour déterminer la stabilité du réseau. On peut donc accélérer la méthode PEBS individuelle comme le montre la procédure ci-dessous que nous avons mise au point :

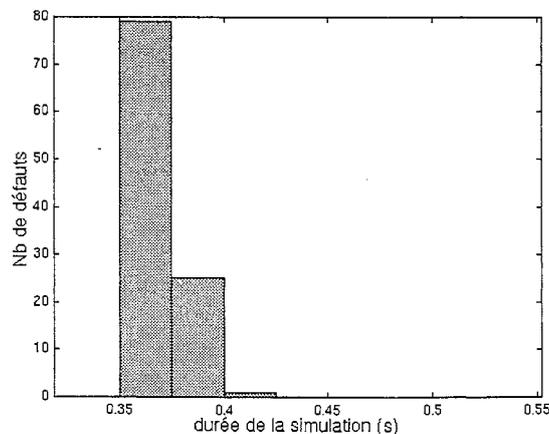
1. A partir de $t=0.35s$ (ce temps correspond à la sélection des machines perturbées), on calcule à chaque pas d'intégration et pour chaque machine perturbée un TEC individuel provisoire. Ce TEC est calculé en prenant l'énergie critique de la machine égale à son E_p individuelle au pas d'intégration. On estime ainsi autant de TEC provisoire qu'il y a de machines perturbées prises en compte.
2. Le TEC provisoire cesse d'être calculé pour une machine si l' E_p individuelle de cette machine atteint un maximum. L'énergie critique de la machine est alors considérée égale à cette E_p individuelle maximum, et le TEC individuel définitif de la machine est calculé en fonction de cette énergie critique. Un TEC provisoire cesse aussi d'être calculé s'il devient supérieur à la somme du TE réel et de la marge d'erreur. Si cette condition est remplie, cela signifie que la machine peut être considérée stable avec le TE égal au TE réel. Enfin, on arrête aussi de calculer un TEC provisoire pour une machine s'il devient supérieur au TEC définitif le plus faible déjà calculé. Ceci signifie que la machine en question n'est pas la machine la plus instable.

- La simulation numérique est arrêtée lorsqu'il n'y a plus de TEC provisoire à calculer. Si aucun TEC individuel définitif n'a été calculé, le réseau est alors considéré stable pour le défaut étudié, et celui-ci est écarté. Sinon, le réseau est potentiellement instable et il faut appliquer une autre méthode d'analyse pour connaître exactement sa stabilité.

Cette procédure, qui s'appuie sur le calcul provisoire à chaque pas de calcul des TEC individuels associés aux machines perturbées, permet de stopper très rapidement la simulation numérique. Dans le cas de la figure III-9, la simulation est arrêtée au bout de 0.449s si on considère que le TE réel est égal à 0.1s, et si on prend une marge d'erreur de 0.1s. La procédure que nous avons proposée ci-dessus permet donc de diminuer le temps d'arrêt de 0.449s à 0.3s, soit une diminution de 33% du temps de simulation.

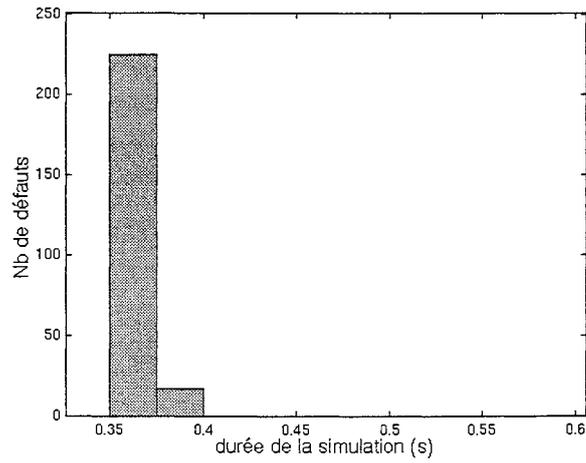
Pour arrêter très rapidement la simulation lorsqu'il y a des machines trouvées très instables avec le défaut maintenu en permanence, c'est-à-dire des machines pour lesquelles l'Ep individuelle ne fait que décroître avec la trajectoire de défaut, on stoppe la simulation si l'Ep individuelle d'une machine perturbée est négative à $t=0.35s$. On considère qu'une Ep individuelle est positive à $t=0.35s$ si elle a un maximum positif. Cette hypothèse n'est peut-être pas toujours vraie, et l'on risque de sous-estimer fortement le TEC inutilement, mais cela permet aussi d'arrêter très rapidement la simulation si des machines sont trouvées toujours instables avec la méthode PEBS individuelle. Normalement, l'hypothèse faite ci-dessus est presque toujours vérifiée. Nous n'avons trouvé que quelques rares cas où elle ne l'est pas. Cette technique évite de perdre trop de temps lorsqu'une machine est trouvée toujours instable avec la méthode PEBS individuelle. Effectivement, la simulation ne dure que 0.35s et, de plus, une partie de cette simulation est réutilisable pour une étude ultérieure. Par exemple, si on réalise une simulation numérique complète de la trajectoire pour connaître exactement la stabilité des défauts trouvés instables avec la méthode PEBS individuelle, la simulation pendant la période de défaut ne sera pas à refaire.

Pour tester la rapidité de la méthode PEBS individuelle, nous avons effectué des essais avec les quatre réseaux tests. Les résultats de ces essais sont montrés dans les figures III-15 à III-18.



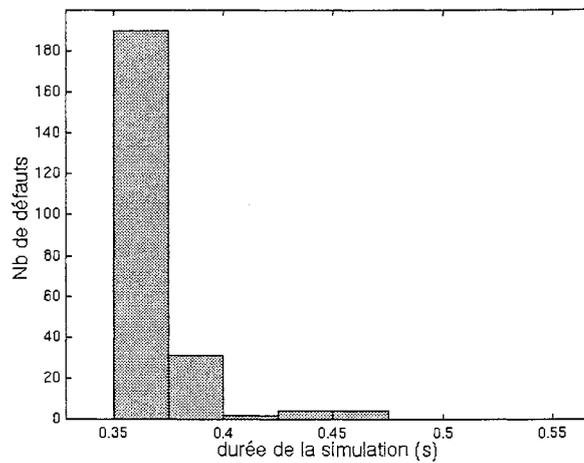
durée minimum = 0.35s durée maximum = 0.41s Nombre total de défauts : 105

Figure III-15 : Résultats des tests avec le réseau New-England



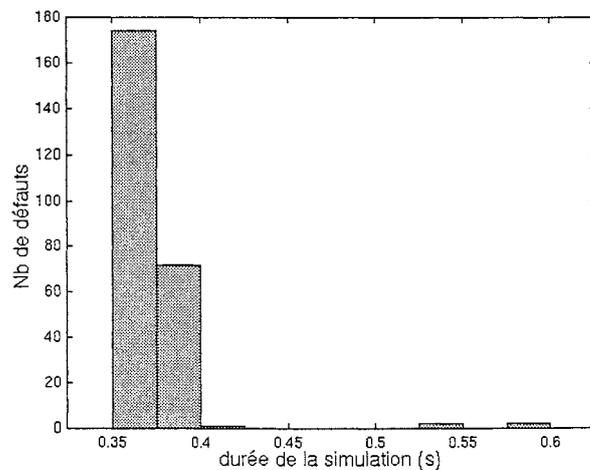
durée minimum = 0.35s durée maximum = 0.40s Nombre total de défauts : 242

Figure III-16 : Résultats des tests avec le réseau Iowa State



durée minimum = 0.35s durée maximum = 0.47s Nombre total de défauts : 231

Figure III-17 : Résultats des tests avec le réseau IEEE20



durée minimum = 0.35s durée maximum = 0.59s Nombre total de défauts : 251

Figure III-18 : Résultats des tests avec le réseau colombien

On peut remarquer sur ces figures que la durée de la simulation est très courte avec la méthode PEBS individuelle. Elle ne dépasse pas 0.59s et, dans de nombreux cas, elle est inférieure à 0.4s : dans 98% des cas avec le réseau New-England, 100% des cas avec le réseau Iowa State, 93.5% des cas avec le réseau IEEE20 et 91% des cas avec le réseau colombien.

Normalement, il faut entre 0.4s et 1s de simulation pour déterminer la stabilité du réseau avec une simulation complète. La méthode que nous proposons ici est donc beaucoup plus rapide puisque le temps de simulation est généralement inférieur à 0.4s. Notre méthode est par conséquent plus efficace pour le filtrage des défauts, tout en étant aussi fiable que la simulation numérique complète.

III.4 CONCLUSION

Nous avons dans ce chapitre étudié les causes de l'échec des méthodes PEBS et hybride FET. Nous avons pu remarquer que ces méthodes, telles qu'elles ont été présentées jusqu'à aujourd'hui, sont difficiles à mettre en oeuvre. Notre étude a montré qu'elles devraient normalement échouer dans la plupart des cas. Bien que des facteurs permettent de limiter fortement leur imprécision, ce qui explique que nous les ayons trouvées assez précises dans le chapitre II, il n'en reste pas moins qu'elles surestiment fortement le TEC dans certains cas. Elles ne sont donc pas applicables au filtrage des défauts.

Pour rendre la méthode PEBS applicable au filtrage, nous avons calculé le TEC en prenant en compte la stabilité de chaque machine, et non plus la stabilité globale du réseau. On évite ainsi que le TEC soit trop surestimé. Les résultats des tests ont montré que cette méthode donne de très bons résultats. De plus, nous avons mis au point une procédure qui permet de déterminer très rapidement la stabilité du réseau avec la méthode PEBS individuelle.

Cette méthode présente donc toutes les caractéristiques pour être utilisée en tant que premier filtre. En effet, elle permet d'écartier très vite la plupart des contingences stables. Ceci est important car beaucoup de défauts sont très stables si le réseau est dans un fonctionnement normal. Notre méthode permet donc de gagner beaucoup de temps dans l'analyse de la sécurité dynamique.

CHAPITRE IV

APPLICATION DES METHODES HYBRIDES A L'ANALYSE DE LA STABILITE TRANSITOIRE

CHAPITRE IV

APPLICATION DES METHODES HYBRIDES A L'ANALYSE DE LA STABILITE TRANSITOIRE

IV.1 INTRODUCTION

Le grand avantage des méthodes hybrides est leur très bonne fiabilité. Elles sont capables de déterminer la stabilité du réseau avec une très grande précision grâce à l'utilisation de la simulation numérique. Cependant, cette simulation numérique rend aussi ces méthodes assez lentes. De plus, le calcul du TEC, qui est effectué à l'aide des méthodes FET et EEAC, est parfois imprécis. Ces deux points faibles doivent être améliorés pour pouvoir utiliser les méthodes hybrides dans le filtrage.

Dans ce chapitre, nous nous proposons d'accélérer ces méthodes en développant des critères d'arrêt efficaces, capables de stopper rapidement la simulation numérique. Ensuite, nous améliorerons leur précision en les associant à une procédure de recherche itérative du TEC.

IV. 2 AMELIORATION DE LA RAPIDITE DES METHODES HYBRIDES

La partie la plus coûteuse en temps de calcul est de loin la simulation numérique. Si on veut donc accélérer les méthodes hybrides, il faut diminuer le temps de calcul nécessaire à cette simulation. Pour cela, deux stratégies sont possibles :

1. Accélérer les calculs liés à la simulation numérique.
2. Réduire l'intervalle de temps de simulation.

Pour accélérer les calculs, les principaux travaux effectués en ce moment concernent la parallélisation des calculs. De gros efforts sont actuellement portés sur cette technique.

Pour notre part, nous nous sommes orientés vers la deuxième stratégie. Pour réduire l'intervalle de temps de simulation, nous avons mis au point des critères d'arrêt efficaces que nous présentons ci-dessous.

IV.2.1 Présentation des critères d'arrêt existants dans la littérature

Les critères d'arrêt sont de deux types. Il existe les critères de stabilité qui ont pour objectif de détecter si le réseau est stable sur la première oscillation, et les critères d'instabilité qui ont eux pour rôle de détecter la perte de stabilité du réseau. Nous présentons ci-dessous les critères les plus intéressants avec à chaque fois une critique pour chacun d'eux.

IV.2.1.1 Les critères de stabilité

Dans [DON-91], Dong a proposé d'arrêter la simulation si la vitesse change de signe pour chacun des générateurs perturbés pendant le défaut. Ce critère est très simple et ne demande pas de calculs supplémentaires. De plus, il arrête très rapidement la simulation puisqu'il détecte le sommet de la première oscillation pour chacune des machines perturbées. Malheureusement, il échoue dans les cas où ce sont des machines peu perturbées pendant le défaut qui perdent la stabilité (oscillations inter-machines).

Chung a introduit dans [CHU-95] un critère très intéressant pour déterminer la fin de la première oscillation. Il est basé sur le calcul de la distance angulaire qui est égale à :

$$d = \left[\sum_{i=1}^n (\tilde{\delta}_i - \tilde{\delta}_i^s)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{IV-1})$$

avec :

$\tilde{\delta}_i$ = angle rotorique de la machine i au point où l'on calcule la distance angulaire.

$\tilde{\delta}_i^s$ = angle rotorique de la machine i au point d'équilibre stable post-défaut.

La fin de la première oscillation est déclarée lorsque la distance angulaire calculée au dernier pas d'intégration est très inférieure à la distance angulaire maximum calculée aux pas d'intégration précédents, ou si le temps de simulation est supérieur à une valeur donnée (par exemple 3 secondes).

Ce critère demande peu de calculs, mais il ne permet pas d'arrêter très rapidement la simulation. En effet, il détecte la fin de la première oscillation et non pas le sommet comme le fait le critère présenté par Dong. De plus, la distance angulaire ne devient faible à la fin de la première oscillation que si les angles rotoriques sont en phase. Or, ceci n'est pas toujours le cas, il peut arriver qu'ils oscillent à des fréquences différentes. La fin de la première oscillation est alors impossible à détecter car la distance angulaire ne diminue jamais suffisamment. Il faut alors continuer la simulation jusqu'au temps maximum que l'on s'est fixé pour savoir si le réseau est stable.

IV.2.1.2 Les critères d'instabilité

Le critère le plus simple a encore été proposé par Dong [DON-91]. Avec ce critère, les angles rotoriques des machines perturbées pendant le défaut sont observés à chaque pas d'intégration. S'il existe une machine pour laquelle l'angle rotorique devient supérieur en valeur absolue à une constante définie à l'avance (par exemple π), le réseau est alors déclaré instable et la simulation est arrêtée.

Ce critère est très simple et ne demande pas de calculs supplémentaires. Cependant, la valeur de la constante est très difficile à déterminer. En effet, il n'y a pas un angle bien précis à partir duquel une machine peut être considérée instable. Si on utilise une valeur élevée (par exemple π), le critère perd de son efficacité puisque l'instabilité est détectée avec un temps de retard. Si on prend une valeur plus faible (par exemple $\frac{\pi}{2}$), la détection est plus rapide, mais des cas peuvent être considérés instables, alors qu'en réalité ils sont stables.

Le critère créé par Maria [MAR-90] a été largement utilisé jusqu'à maintenant pour détecter la sortie du domaine de stabilité. Dans ce critère, l'expression $\sum_{i=1}^n (\tilde{\delta}_i - \tilde{\delta}_i^s) \times (P_{mi} - P_{ei})$ est calculée à chaque pas d'intégration. Lorsque le signe de cette expression change, on considère que la trajectoire du système est sortie du domaine de stabilité.

Ce critère est efficace car il déclare le système instable dès que sa trajectoire sort du domaine de stabilité. Cependant, il peut échouer si la trajectoire est complexe [CHU-95]. Le réseau peut alors être déclaré instable alors qu'il est en réalité stable, ou la perte de stabilité peut être détectée avec du retard.

Comme pour son critère de stabilité, Chung a mis au point un critère d'instabilité basé sur la distance angulaire [CHU-95]. La procédure de ce critère est la suivante :

1. Détermination de la machine la plus perturbée à chaque pas d'intégration. Cette machine est celle qui a l'angle rotorique le plus grand en valeur absolue.
2. Calcul de la distance angulaire (voir équation IV-1) à chaque pas d'intégration.
3. Si cette distance augmente de façon importante, et que dans le même temps l'accélération et l'angle rotorique de la machine la plus perturbée sont de mêmes signes, le réseau est considéré instable. Le réseau est aussi considéré instable si l'angle rotorique de la machine la plus perturbée dépasse 180° en valeur absolue.

Ce critère détecte l'instabilité guère plus rapidement que le premier critère présenté ci-dessus. En effet, l'instabilité est détectée lorsque la distance angulaire se met à croître rapidement. Or, ceci signifie que le système est déjà sorti du domaine de stabilité et qu'on n'a donc pas détecté sa perte de stabilité dès sa sortie.

IV.2.1.3 Conclusion

Parmi les critères de stabilité proposés jusqu'à aujourd'hui, le critère proposé par Dong est le plus intéressant. Il permet d'arrêter très rapidement la simulation. Ce critère est donc celui que nous avons choisi de développer et d'améliorer pour la détection de la stabilité.

Parmi les critères d'instabilité, aucun n'est vraiment intéressant. Ils sont soit trop lents dans la détection de l'instabilité, soit peu fiables.

IV.2.2 Développements de critères d'arrêts

Après avoir passé en revue les principaux critères d'arrêt, nous nous proposons de développer des critères fiables et efficaces.

IV.2.2.1 Mise au point d'un critère de stabilité

Un critère de stabilité doit détecter le plus rapidement possible si le système est stable sur la première oscillation. Dans nos travaux, nous avons considéré qu'une machine est stable, sur la première oscillation, si son angle rotorique atteint un maximum en valeur absolue. Dans ce cadre là, le critère défini par Dong est le plus intéressant puisqu'il détecte les changements de signe des vitesses rotors. Cependant, ce critère ne s'intéresse qu'aux machines perturbées pendant le défaut. Or, nous avons vu, dans le chapitre III, que des machines peu perturbées pendant le défaut peuvent perdre la stabilité après. Bien que ce type d'instabilité soit dû à des oscillations inter-machines, il est préférable que le critère de stabilité le prenne en compte.

Pour cela, on peut utiliser tous les angles rotoriques pour détecter la stabilité. Ainsi, on est sûr que toutes les machines sont stables sur la première oscillation lorsque le réseau est trouvé stable. Cependant, le critère perd beaucoup de son efficacité car il faut attendre que tous les angles atteignent un maximum en valeur absolue avant de pouvoir considérer un système stable. Or, il peut arriver que les angles rotoriques de certaines machines peu perturbées mettent plus de temps à atteindre un maximum que les angles rotoriques des machines perturbées. Ce phénomène est montré dans la figure IV-1. Cette figure représente l'angle rotorique de la machine perturbée (une seule machine est perturbée par le défaut) et l'angle rotorique qui met le plus de temps pour atteindre un maximum pour le défaut [4] [0-0] du réseau IEEE20. Le TE est égal au TEC-0.01s ($TE=0.283s$). On peut remarquer que l'angle rotorique de la machine peu perturbée (en pointillé) met beaucoup plus de temps à atteindre un maximum que l'autre angle (0.98s au lieu de 0.6s). Dans ce cas-là, la stabilité a été trouvée 0.38s plus tard (soit +63% de temps de simulation) qu'avec le critère de Dong, et ceci inutilement. Cette technique de détection de la stabilité n'est donc pas toujours très efficace.

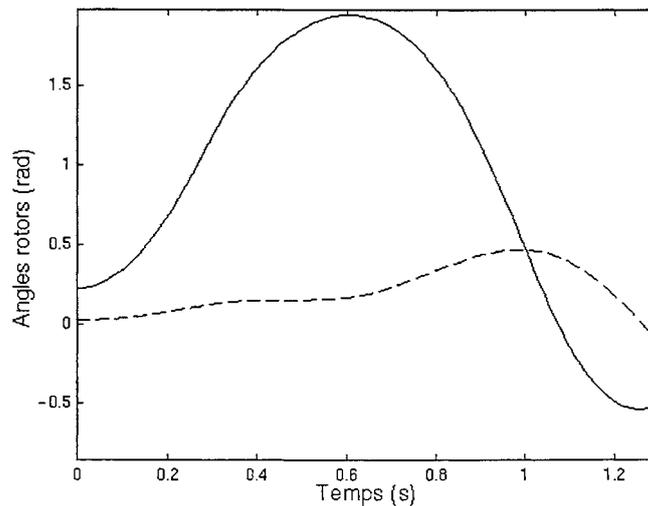


Figure IV-1 : Angles rotoriques pour le défaut [4] [0-0] du réseau IEEE20

Pour garder l'efficacité du critère de Dong tout en prenant en compte les pertes de stabilité dues à des oscillations inter-machines, nous avons mis au point une technique décrite ci-dessous :

1. On vérifie si les machines perturbées pendant le défaut sont stables. Une machine est considérée stable si son angle rotorique atteint un maximum en valeur absolue.
2. Si toutes les machines perturbées par le défaut sont stables, on cherche, au moment où le système est déclaré stable, si des machines peu perturbées pendant le défaut tendent à devenir instables. Si c'est le cas, on continue la simulation jusqu'à ce que ces machines soient déclarées stables, ou que le réseau soit déclaré instable. Si ces machines sont trouvées stables, on recherche à nouveau si des machines dont la stabilité n'a pas encore été vérifiée ne tendent pas à perdre la stabilité. Et ainsi de suite jusqu'à ce que le réseau soit déclaré définitivement stable.

L'identification des machines perturbées est effectuée à partir de l'énergie cinétique. Comme nous l'avons indiqué dans le chapitre III, l'énergie cinétique d'un générateur à l'élimination du défaut est une très bonne mesure de sa perturbation puisqu'elle représente l'énergie qui devra être convertie en énergie potentielle après le défaut. Ainsi, toutes les machines qui ont une énergie cinétique supérieure à $E_{cmax} \cdot \kappa$ sont considérées comme perturbées par le défaut dans la technique proposée ci-dessus. E_{cmax} représente l'énergie cinétique de la machine la plus perturbée, et κ est un facteur de pondération qui permet de sélectionner les machines perturbées par le défaut.

Pour savoir si une machine considérée peu perturbée dans l'étape 1 est en train de perdre la stabilité après l'élimination du défaut, on examine la valeur de son angle rotorique au moment où toutes les machines perturbées sont trouvées stables. Si cet angle dépasse une certaine valeur (par exemple 90°), la machine est considérée potentiellement instable et l'on vérifie sa stabilité. Cette technique permet de prendre en compte les instabilités dues à des oscillations inter-machines. En effet, si un réseau perd la stabilité à cause de la présence d'oscillations

inter-machines, les machines instables ont leurs angles rotoriques qui divergent lentement. Il est donc difficile de les identifier à l'élimination du défaut. Par contre, leur identification est beaucoup plus facile au moment où le réseau est trouvé stable du point de vue transitoire puisque leurs angles rotoriques ont eu le temps d'évoluer.

La technique que nous proposons est donc très fiable. Une machine instable, qui pourrait échapper à la première identification, sera de fait trouvée potentiellement instable lors des identifications suivantes, à moins que son angle rotorique évolue vraiment très lentement, mais ceci arrive très rarement.

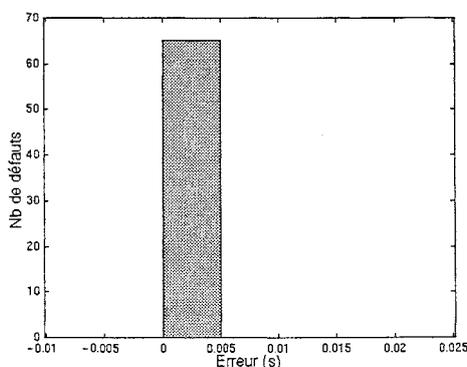
Tests du critère de stabilité

Pour s'assurer que cette technique est fiable, nous l'avons testé sur les quatre réseaux tests. Les conditions d'essais sont les mêmes que celles utilisées lors des essais comparatifs dans le chapitre II. Les tests ont consisté à comparer deux TEC : le TEC trouvé en prenant en compte toutes les machines pour déclarer la stabilité, et le TEC trouvé avec notre critère.

Rappelons que le TEC est calculé à chaque fois en utilisant une procédure itérative. Le calcul du TEC est donc un excellent moyen de tester la fiabilité d'un critère d'arrêt. Pour calculer ces TEC, il a fallu associer un critère d'instabilité aux critères de stabilité. Ce critère devait être très fiable pour que le réseau ne puisse pas être déclaré intempestivement instable. Nous avons donc choisi de déclarer le réseau instable si l'angle rotorique d'une machine surveillée dépasse $1,5\pi$ radians en valeur absolue. Comme cette valeur est très grande, on est sûr que la machine a bien perdu la stabilité lorsque cet angle est atteint.

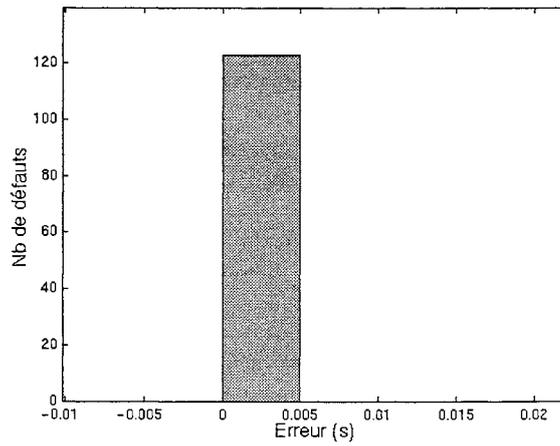
Dans l'identification des machines perturbées, nous avons pris le coefficient κ égal à 0.2, et une machine est considérée comme potentiellement instable dans l'étape 2 si son angle rotorique dépasse $\pi/2$ radians au moment où les machines surveillées sont trouvées stables.

Les histogrammes ci-dessous récapitulent les résultats obtenus avec les quatre réseaux tests. L'erreur est égale à la différence entre le TEC obtenu avec notre critère et le TEC obtenu en prenant en compte toutes les machines.



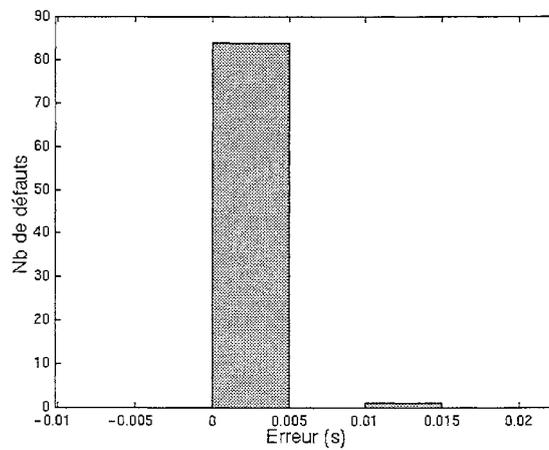
erreur minimum = 0s erreur maximum = 0s Nombre total de défauts : 65

Figure IV-2 : Résultats des tests du critère de stabilité avec le réseau New-England



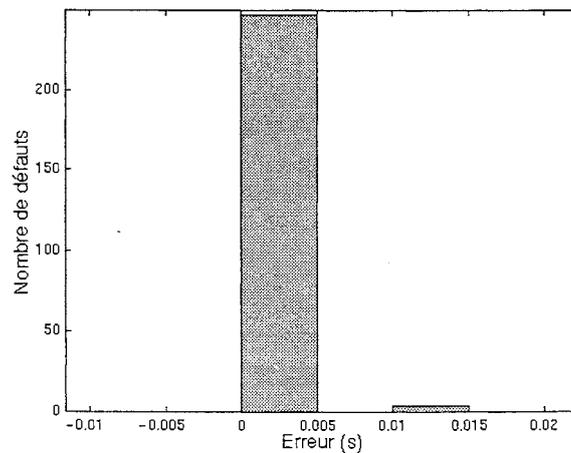
erreur minimum = 0s erreur maximum = 0s Nombre total de défauts : 123

Figure IV-3 : Résultats des tests du critère de stabilité avec le réseau Iowa State



erreur minimum = 0s erreur maximum = +0.01s Nombre total de défauts : 85

Figure IV-4 : Résultats des tests du critère de stabilité avec le réseau IEEE20



erreur minimum = 0s erreur maximum = +0.01s Nombre total de défauts : 251

Figure IV-5 : Résultats des tests du critère de stabilité avec le réseau colombien

Nous pouvons voir que les TEC obtenus avec notre critère sont très bons. L'erreur ne dépasse jamais 0.01s. Ce qui est tout à fait acceptable. Ce critère permet donc de détecter les instabilités dues à des oscillations inter-machines, tout en arrêtant rapidement la simulation numérique.

Pour illustrer l'efficacité de notre critère de stabilité, nous avons effectué quelques essais dont les résultats sont montrés dans le tableau IV-1. Dans ces essais, le temps de simulation nécessaire pour détecter la stabilité avec notre critère (t_{final1}) est comparé au temps de simulation nécessaire si on prend en compte tous les angles rotoriques pour déclarer la stabilité (t_{final2}). Les TE utilisés pour réaliser les simulations sont égaux aux TEC-0.05s. Les essais ont été réalisés avec le réseau New-England.

défaut	t_{final1} (s)	t_{final2} (s)	Δt_{final}
[5] [0-0]	0,436	0,673	-35%
[7] [7-6]	0,479	0,679	-29%
[10] [10-13]	0,450	0,725	-38%
[17] [17-18]	0,799	0,911	-12%
[25] [25-26]	0,5	0,8	-37,5%

Tableau IV-1 : Illustration de l'efficacité du critère de stabilité proposé

IV.2.2.2 Conception d'un critère d'instabilité

Nous avons vu précédemment qu'aucun critère d'instabilité existant n'est vraiment intéressant. La détection de l'instabilité est soit trop lente, soit peu fiable. Nous avons donc cherché à mettre au point un nouveau critère et non pas à améliorer un critère existant.

Dans la conception de ce nouveau critère, notre objectif est de détecter l'instabilité dès que la trajectoire du système sort du domaine de stabilité. Pour cela, nous avons utilisé la FET et en particulier la marge d'énergie transitoire (voir § I.3.3.1.a). Pour détecter la sortie du domaine de stabilité, cette marge est calculée à chaque pas d'intégration. Le réseau est considéré instable lorsque cette marge devient négative.

Pour le calcul de la marge d'énergie transitoire, nous utilisons la technique proposée par Maria et présentée dans le § I.3.4.1.b. Cette technique consiste à calculer la marge d'énergie transitoire en faisant une projection linéaire sur la limite du domaine de stabilité. Elle n'est pas très précise pour le calcul de l'énergie critique, mais ce n'est pas important car c'est le signe de cette marge qui nous intéresse. Dans ce cas-là, cette technique est tout à fait fiable. Elle permet de très bien déterminer si on est dans ou hors du domaine de stabilité.

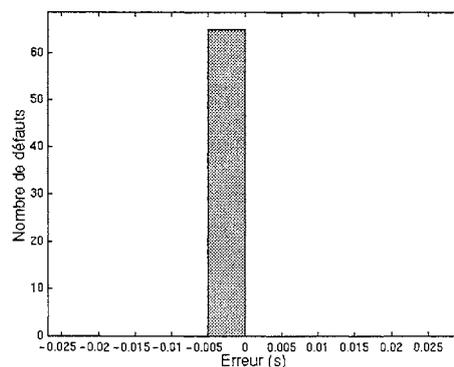
S'il y a une erreur, elle est de toute façon limitée. En effet, si le réseau est instable, la marge d'énergie transitoire finira toujours par devenir négative. La détection de l'instabilité est seulement un peu retardée. Si le réseau est stable, il y a un risque qu'il puisse être déclaré instable. Mais cela ne peut arriver que si le TE est très proche du TEC. L'erreur est donc faible, de toute façon le TEC est sous-estimé.

Si ce critère détecte rapidement l'instabilité, il demande aussi beaucoup de calculs. En effet, le calcul de la marge d'énergie transitoire à chaque pas d'intégration est coûteux en temps de calcul malgré la simplicité de la technique utilisée. En fait, on peut diminuer considérablement le nombre de calculs nécessaires. Comme c'est le signe de la marge d'énergie qui nous intéresse et non pas sa valeur, on peut se contenter de n'effectuer qu'un pas sur la ligne droite de recherche de la limite de stabilité, juste pour connaître le signe de la marge d'énergie. On détermine ainsi rapidement si la trajectoire du système est dans ou hors du domaine de stabilité, et l'on économise beaucoup de temps. Le critère ralentit alors très peu la simulation numérique.

Test du critère d'instabilité

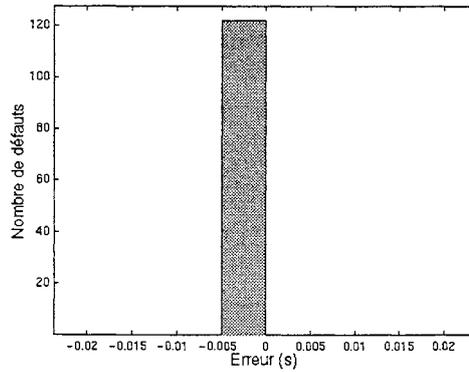
Pour vérifier la fiabilité de notre critère, nous l'avons testé sur quatre réseaux tests, comme le critère de stabilité. Pour tester correctement ce critère, nous l'avons associé à un critère de stabilité très fiable. Nous avons utilisé le critère de Dong en prenant en compte la stabilité de toutes les machines.

Les conditions d'essais sont les mêmes que pour le critère de stabilité. Les résultats des essais sont synthétisés ci-dessous sous forme d'histogramme. L'erreur est égale à la différence entre le TEC calculé avec notre critère et le TEC calculé avec un critère d'instabilité très fiable (réseau considéré instable si un angle rotorique dépasse 1.5π radians).



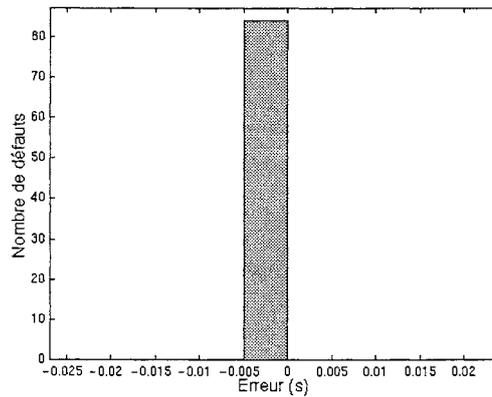
erreur minimum = -0.002s erreur maximum = 0s Nombre total de défauts : 65

Figure IV-6 : Résultats des tests du critère d'instabilité avec le réseau New-England



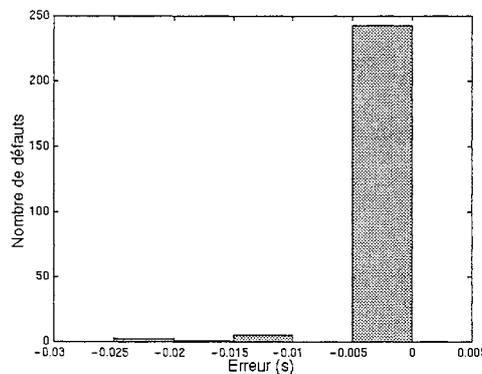
erreur minimum = -0.001s erreur maximum = 0s Nombre total de défauts : 122

Figure IV-7 : Résultats des tests du critère d'instabilité avec le réseau Iowa State



erreur minimum = -0.001s erreur maximum = 0s Nombre total de défauts : 84

Figure IV-8 : Résultats des tests du critère d'instabilité avec le réseau IEEE20



erreur minimum = -0.02s erreur maximum = 0s Nombre total de défauts : 251

Figure IV-9 : Résultats des tests du critère d'instabilité avec le réseau colombien

Les résultats ci-dessus montrent que le critère d'instabilité que nous avons mis au point est très fiable. L'erreur n'excède pas 0.02s en valeur absolue, ce qui est bon. De plus, cette erreur est toujours négative, ceci pour les raisons que nous avons indiquées plus haut. Il n'y a donc pas de risques de considérer un défaut instable comme stable.

Nous avons donc réussi à créer un critère d'instabilité très fiable qui détecte rapidement l'instabilité.

Pour illustrer le temps de simulation que l'on peut économiser avec notre critère d'instabilité, nous avons effectué des essais dont les résultats sont montrés dans le tableau IV-2. Dans ces essais, le temps de simulation nécessaire pour détecter l'instabilité avec notre critère (tfinal1) est comparé au temps de simulation nécessaire si on déclare l'instabilité lorsqu'un angle rotorique dépasse π radians en valeur absolue (tfinal2). Les TE utilisés pour réaliser les simulations sont égaux aux TEC+0,05s. Les simulations ont été réalisées avec le réseau New-England.

défait	tfinal1 (s)	tfinal2 (s)	Δ tfinal
[5] [0-0]	0,486	0,711	-32%
[7] [7-6]	0,554	0,754	-27%
[10] [10-13]	0,495	0,725	-32%
[17] [17-18]	0,744	0,844	-12%
[25] [25-26]	0,4	0,5	-20%

Tableau IV-2 : Illustration de l'efficacité du critère d'instabilité proposé

IV.3 AMELIORATION DE LA PRECISION DES METHODES HYBRIDES

Dans les chapitres II et III, nous avons identifié les causes des erreurs rencontrées avec les méthodes hybride FET et hybride EEAC.

L'erreur, dans le cas de la méthode hybride EEAC, provient du fait que les machines ne se décomposent pas toujours en deux groupes de machines. Elle peut aussi avoir pour origine une mauvaise identification des machines critiques. Quoiqu'on fasse pour améliorer la précision de cette méthode, il y aura toujours des cas où elle sera très imprécise puisqu'elle ne peut s'appliquer que si le réseau se décompose en deux groupes de machines. Ce qui n'est pas toujours possible.

En ce qui concerne la méthode hybride FET, son imprécision vient du fait que les trajectoires instables du système sont différentes suivant le TE dans la plupart des cas. Ceci rend impossible un calcul précis de l'énergie critique. Bien que des facteurs font que l'erreur sur le TEC est souvent largement compensée, cette erreur peut rester très importante. La méthode hybride FET n'est donc pas utilisable.

La technique proposée dans le chapitre III pour fiabiliser la méthode PEBS ne peut pas être utilisée ici pour améliorer la précision. En effet, si l'étude de la stabilité pour chaque machine perturbée évite une surestimation du TEC, elle entraîne aussi parfois une sous-estimation

importante de celui-ci. Cette technique ne permet donc pas d'améliorer la précision de la méthode hybride FET.

Par conséquent, le seul moyen qui existe pour calculer précisément le TEC consiste à utiliser une trajectoire instable proche de la trajectoire critiquelement instable. Ainsi, l'énergie potentielle maximum est quasiment égale à l'énergie critique. Cependant, comme on ne connaît pas le TEC puisque c'est la grandeur que l'on recherche, cette technique n'est pas applicable.

La précision de ces deux méthodes hybrides ne peut donc pas être améliorée. Par conséquent, il faut utiliser une autre méthodologie pour pouvoir calculer précisément le TEC.

IV.4 LA METHODE ITERATIVE HYBRIDE

La procédure itérative est sans aucun doute la méthode de recherche du TEC la plus précise. Elle recherche le TEC en réalisant plusieurs simulations numériques successives (méthode dichotomique). Le problème de cette méthode est que la convergence vers le TEC est assez lente, ce qui entraîne un nombre important de simulations à réaliser.

Pour diminuer ce nombre de simulations, et donc réduire le temps de calcul, nous avons eu l'idée d'utiliser la procédure itérative de recherche en combinaison avec les méthodes hybrides. Ces méthodes sont employées pour estimer le TEC à la fin de chaque simulation numérique afin d'assurer une convergence plus rapide vers le TEC réel.

IV.4.1 La méthode itérative hybride basée sur la FET

Nous avons, dans un premier temps, utilisé seulement la FET pour accélérer la convergence car cette méthode peut s'appliquer à tous les cas de figure. Ce qui n'est pas le cas de la méthode hybride EEAC. L'organigramme de la méthode que nous proposons est présenté dans la figure IV-10. Cette méthode sera appelée par la suite méthode itérative hybride FET.

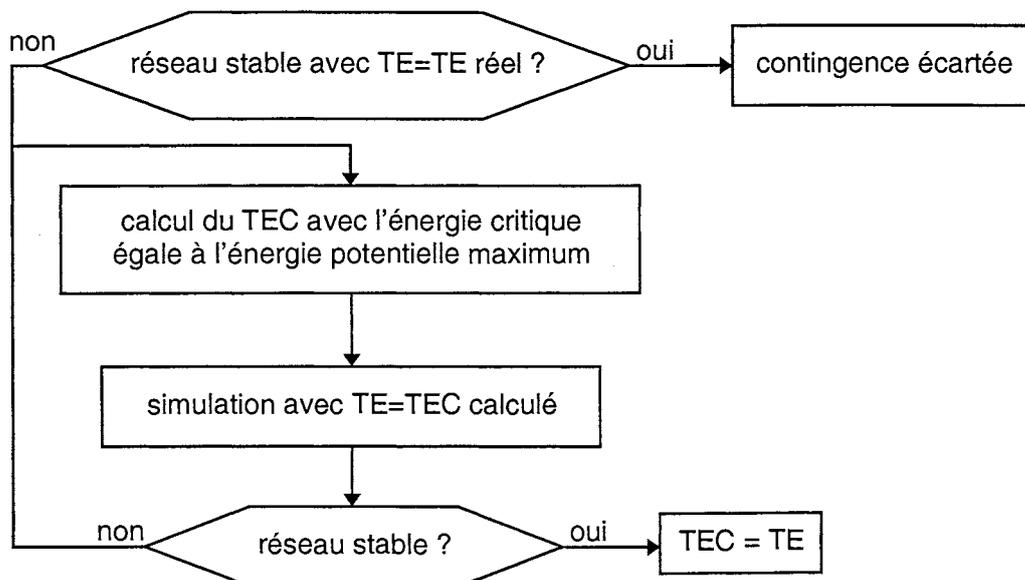


Figure IV-10 : Organigramme de la méthode itérative hybride FET

La première étape de la méthode consiste à réaliser une simulation numérique pour déterminer la stabilité du réseau. La simulation est réalisée avec un TE égal au TE réel. Si le réseau est stable, le défaut est écarté. S'il est instable, on recherche le TEC à l'aide d'une procédure itérative.

La première étape de cette procédure consiste à estimer le TEC à l'aide de la FET, et à partir de la simulation effectuée auparavant. Ensuite, on vérifie si ce TEC est correct en faisant une nouvelle simulation avec le TE égal au TEC estimé. Si le réseau est stable, ceci signifie que la convergence est atteinte, et le TEC est considéré égal au TE.

Etant donné que la convergence est considérée atteinte lorsque le système est trouvé stable, il faut utiliser une technique, pour calculer le TEC, qui ne donne pas des résultats trop conservatifs. Sinon, on risque de trop sous-estimer le TEC réel. Nous avons vu dans le chapitre III que l'énergie critique correspond à l'énergie potentielle maximum sur la trajectoire critique instable. Le meilleur moyen de calculer l'énergie critique à partir d'une simulation numérique est donc de prendre l'énergie potentielle maximum. Cette technique est utilisée par les méthodes PEBS et hybride FET. Elle donne des résultats qui sont rarement très sous-estimés comme l'ont montré les tests de ces méthodes. Cette technique de calcul de l'énergie critique peut donc être utilisée dans la méthode itérative hybride FET.

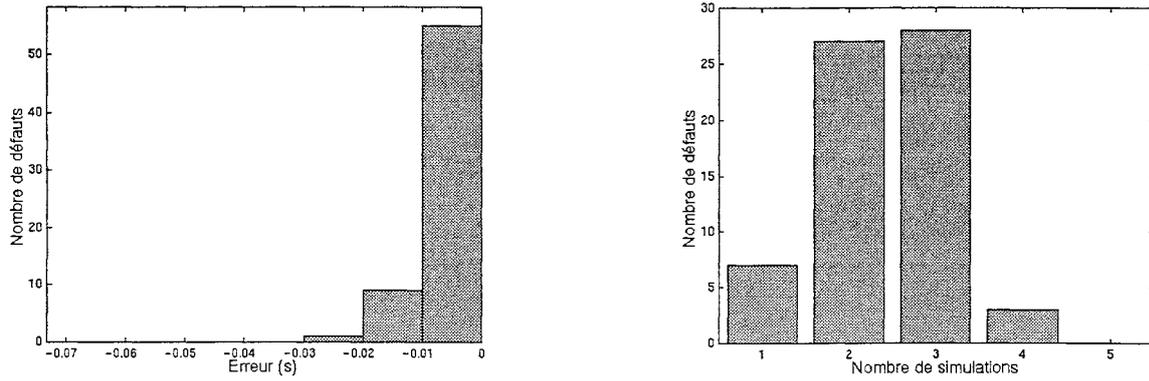
Dans l'organigramme ci-dessus, la convergence vers le TEC se fait donc en gardant le réseau instable. Nous avons choisi cette stratégie car l'estimation correcte de l'énergie critique est souvent impossible lorsque le réseau est stable. Le problème rencontré est le même que lorsque le réseau est instable. L'estimation précise de l'énergie critique est impossible si la trajectoire critique instable du système change de direction après l'élimination du défaut. De plus, comme le TEC doit être calculé pour les défauts instables seulement, nous avons choisi de conserver le réseau instable pendant la convergence.

IV.4.2 Test de la méthode itérative hybride FET

Pour valider la méthode proposée ci-dessus, nous l'avons testée sur les quatre réseaux tests. Nous avons en particulier vérifié sa précision, et sa rapidité. Pour la précision, nous avons comparé le TEC obtenu avec cette méthode avec le TEC réel. Pour la rapidité, nous avons examiné le nombre de simulations nécessaire pour trouver le TEC. La première simulation effectuée pour déterminer la stabilité n'est pas prise en compte dans le comptage.

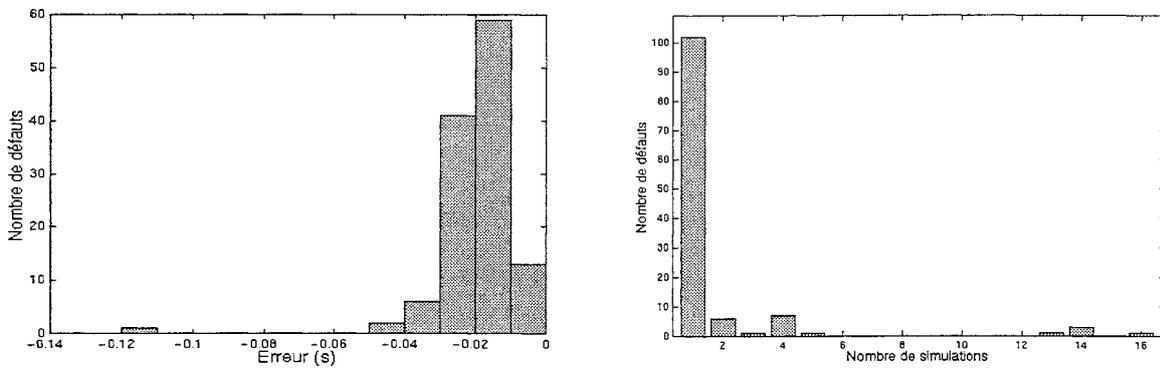
Le TE de départ a été pris égal au $TEC+0.25s$. Ce TE important permet de bien tester l'efficacité de notre méthode.

Résultats des essais



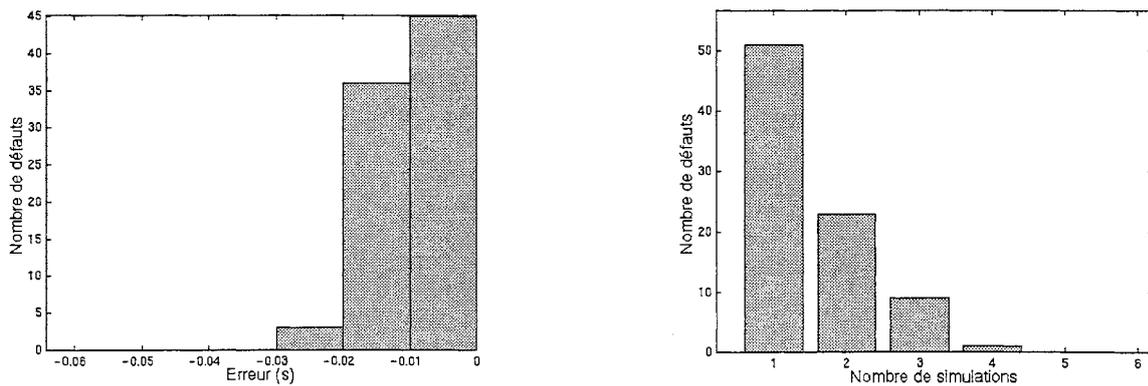
erreur minimum : -0.020s Nb maximum de simulations : 4 Nb total de défauts : 65

Figure IV-11 : Résultats des essais avec le réseau New-England



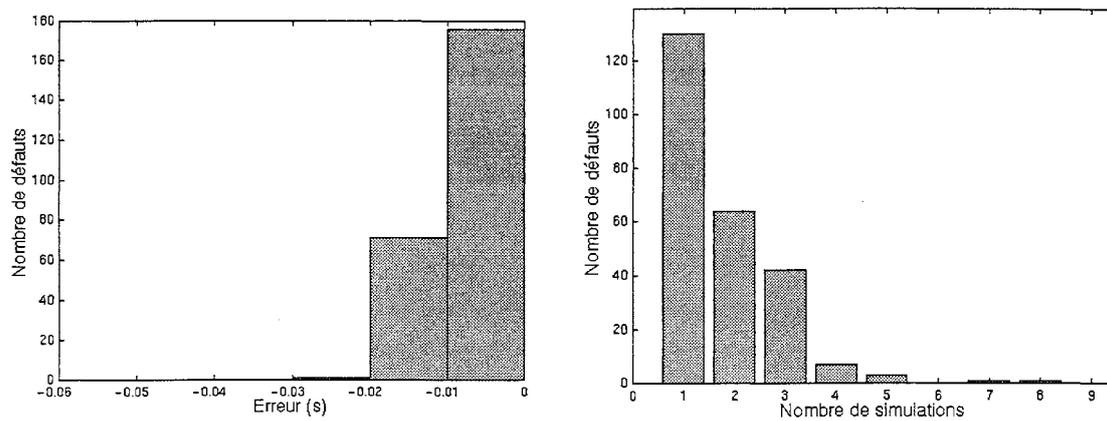
erreur minimum : -0.116s Nb maximum de simulations : 16 Nb total de défauts : 122

Figure IV-12 : Résultats des essais avec le réseau Iowa State



erreur minimum : -0.027s Nb maximum de simulations : 4 Nb total de défauts : 84

Figure IV-13 : Résultats des essais avec le réseau IEEE20



erreur minimum : -0.021s Nb maximum de simulations : 8 Nb total de défauts : 248

Figure IV-14 : Résultats des essais avec le réseau colombien

Analyses des essais

Les résultats obtenus montrent que la précision de la méthode est bonne, surtout avec les réseaux New-England, IEEE20 et colombien où les erreurs sont inférieures à 0.027s en valeur absolue. La précision est un peu moins bonne avec le réseau Iowa State, mais l'erreur n'excède pas 0.04s, sauf pour un cas où le TEC est très sous-estimé (-0.116s). Ce cas a déjà été identifié et analysé dans les chapitres II et III. Nous ne l'étudierons donc pas à nouveau ici. Excepté ce cas, l'erreur sur le TEC ne dépasse donc jamais 0.04s, ce qui est très acceptable pour l'analyse de la sécurité dynamique. Une telle erreur n'a en effet pas beaucoup de conséquences sur le classement par ordre de sévérité des contingences instables.

Si on regarde le nombre de simulations nécessaires pour trouver le TEC, on se rend compte que la méthode itérative hybride FET converge assez rapidement. Il faut en général moins de 4 simulations pour trouver le TEC. De plus, une seule simulation suffit souvent pour obtenir le TEC. Le gain de temps est donc important par rapport à la méthode dichotomique. Avec cette méthode, il faut réaliser quatre simulations pour trouver un TEC compris entre 0s et 0.35s avec une précision de 0.025s.

Cependant, il y a quelques défauts pour lesquels il faut effectuer plus de quatre simulations pour obtenir le TEC. Ces défauts sont au nombre de onze, ils concernent les réseaux Iowa State et colombien. Le nombre de simulations à effectuer pour ces défauts peut être très important (>10), il atteint même 16 simulations pour le défaut [124] [124-125] du réseau Iowa State.

La raison de cette lente convergence a pour origine deux phénomènes. Premièrement, ces défauts correspondent à des cas où les méthodes PEBS et hybride FET sont très imprécises. Une estimation correcte de l'énergie critique n'est pas possible dans ces cas. Cependant, il existe d'autres défauts pour lesquels cette estimation n'est pas possible sans pour autant que la convergence soit très lente. En fait, cette lenteur s'explique aussi par un deuxième phénomène.

L'énergie critique étant estimée égale à l' E_p maximum, la diminution du TEC estimé est assurée par la différence entre l'énergie totale injectée dans le réseau pendant le défaut et l' E_p maximum. Cette différence est normalement assez importante pour que le TEC diminue suffisamment. Dans le cas présent, cette condition n'est pas vérifiée. Toute l'énergie injectée pendant le défaut se transforme quasiment en énergie potentielle après le défaut. Ceci est montré dans la figure IV-15 qui représente l'évolution des différentes énergies pour le défaut [124] [124-125] du réseau Iowa State. Le TE est égal au $TEC+0.08s$ ($TE=0.41s$).

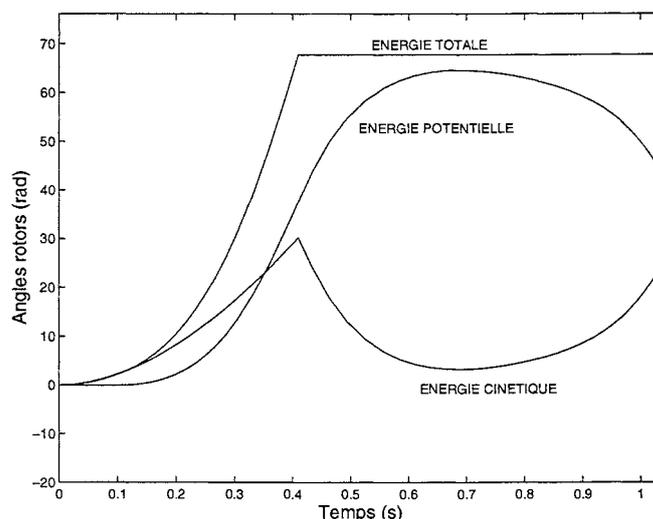


Figure IV-15 : Evolution des énergies pour le défaut [124] [124-125] du réseau Iowa State

On voit bien sur cette figure que l'énergie potentielle maximum est quasiment égale à l'énergie totale injectée dans le réseau malgré la forte instabilité du réseau. Ce phénomène se produit lorsqu'il y a une perte de stabilité due à des oscillations inter-machines. Les machines qui perdent la stabilité ont une énergie cinétique faible car elles sont peu perturbées par le défaut, l'énergie cinétique totale est donc quasiment égale à la somme des énergies cinétiques des machines perturbées. Or, comme ces machines sont stables, l'énergie cinétique totale s'annule presque après le défaut. Dans le cas étudié ci-dessus, une seule machine est perturbée par le défaut, ce qui explique que l'énergie potentielle maximum est quasiment égale à l'énergie totale. La figure IV-16 représente l'énergie cinétique de toutes les machines pour les mêmes conditions que dans la figure IV-15.

On voit sur cette figure que l'énergie cinétique de la machine perturbée (en trait mixte) est de loin la plus importante à l'élimination du défaut, bien plus importante que l'énergie cinétique de la machine instable (en trait pointillé). L'énergie cinétique totale est donc quasiment égale à l'énergie cinétique de la machine perturbée, ce qui explique qu'elle s'annule presque, et que l'énergie potentielle maximum est quasiment égale à l'énergie totale. Ce résultat confirme le fait que les méthodes FET échouent lorsque l'instabilité est due à des oscillations inter-machines.

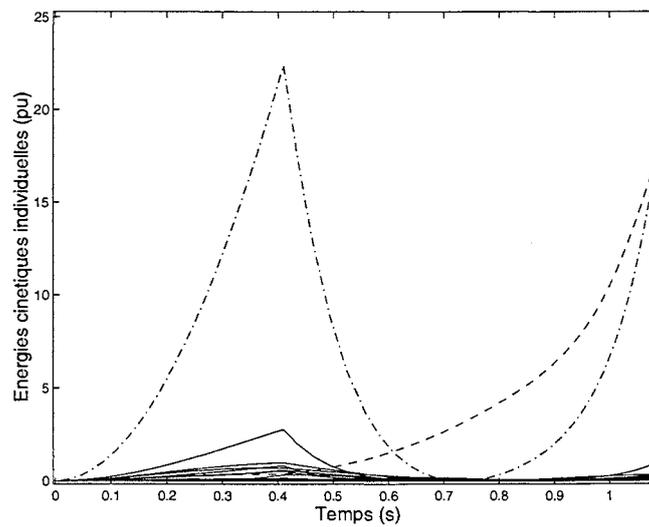


Figure IV-16 : Energies cinétiques individuelles pour le défaut [124] [124-125]
du réseau Iowa State

L'utilisation de l'énergie potentielle maximum pour calculer le TEC ne garantit donc pas toujours une convergence rapide, surtout si l'instabilité est due à des oscillations inter-machines. Pourtant, on ne peut pas utiliser d'autres techniques pour calculer l'énergie critique. Il faut donc utiliser une autre méthode pour accélérer la convergence.

IV.4.3 Accélération de la convergence de la méthode itérative hybride FET

Pour assurer une convergence rapide dans tous les cas, nous avons imposé une diminution minimum pour l'énergie critique. Cette diminution minimum est calculée à partir de l'énergie totale injectée dans le réseau. Avec cette technique, l'énergie critique est égale à :

$$E_{\text{critique}} = E_{\text{total}} * \alpha \quad (\text{IV-2})$$

E_{total} est l'énergie totale injectée dans le réseau pendant le défaut. L'indice α correspond au taux de décroissance de l'énergie critique. Avec cette méthode, on assure une décroissance suffisante de l'énergie critique lorsque l'énergie potentielle maximum est quasiment égale à l'énergie totale. On évite ainsi les convergences trop longues.

L'organigramme de la méthode itérative hybride FET accélérée est présenté dans la figure IV-17. On voit sur cet organigramme que l'énergie critique est calculée de deux façon différentes. La première énergie critique est calculée comme dans la méthode originale. C'est-à-dire qu'elle est égale à l'énergie potentielle maximum. La deuxième énergie critique est calculée en imposant une décroissance minimum. Le TE pour la prochaine simulation est ensuite calculé en prenant l'énergie critique minimum parmi les deux calculées.

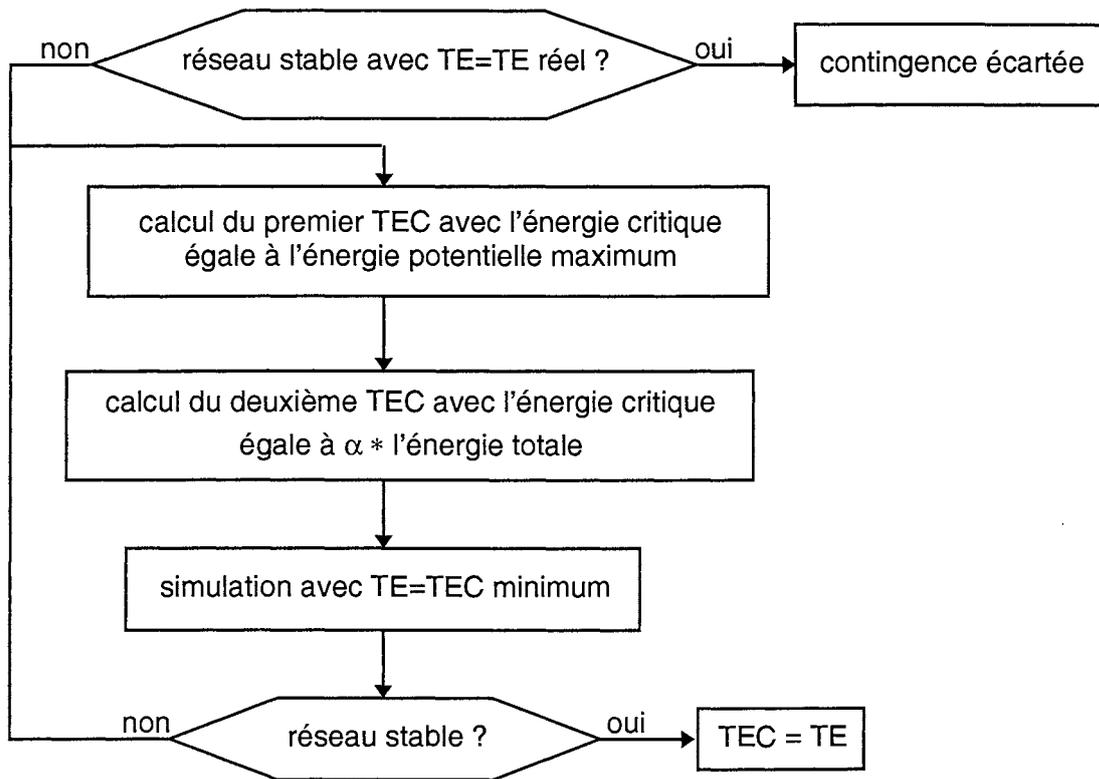


Figure IV-17 : Organigramme de la méthode itérative hybride FET accélérée

Le défaut [124] [124-125] du réseau Iowa State donne une bonne illustration de l'efficacité de cette technique d'accélération lorsque l'énergie critique ne diminue pas suffisamment. Le tableau IV-3 présente les résultats obtenus avec la méthode itérative hybride FET non accélérée, et le tableau IV-4 les résultats obtenus avec la méthode accélérée. Le TEC réel pour ce défaut est égal à 0.330s. Avec la technique d'accélération, le nombre de simulations nécessaire pour trouver le TEC est passé de 16 à 4. Ce qui est un progrès très important. La technique que nous proposons permet donc d'accélérer la convergence lorsque la perte de stabilité est due à des oscillations inter-machines. Elle permet aussi d'accélérer la convergence dans les autres cas.

Simulation n°	1	2	3	4	5	6	7	8
TEC estimé (s)	0.413	0.404	0.397	0.391	0.386	0.380	0.374	0.369
Simulation n°	9	10	11	12	13	14	15	16
TEC estimé (s)	0.363	0.358	0.353	0.347	0.342	0.336	0.331	0.325

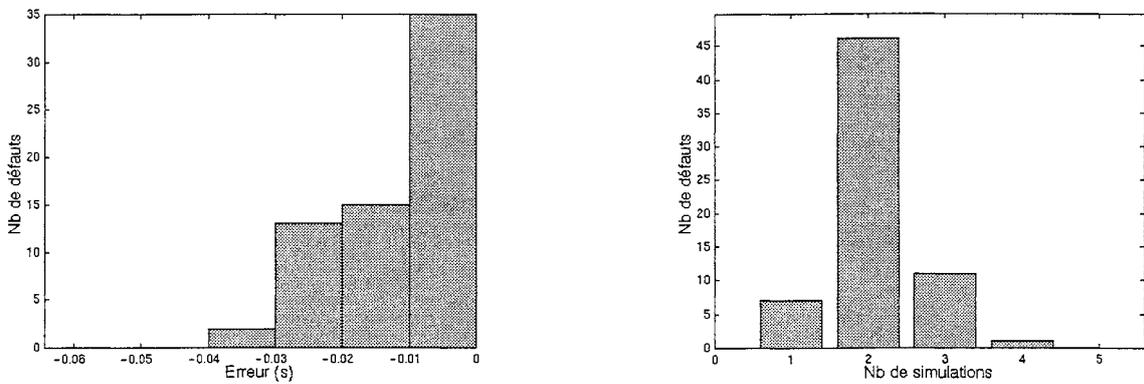
Tableau IV-3 : Convergence avec la méthode itérative hybride FET non accélérée

Simulation n°	1	2	3	4
TEC estimé (s)	0.413	0.378	0.347	0.319

Tableau IV-4 : Convergence avec la méthode itérative hybride FET accélérée

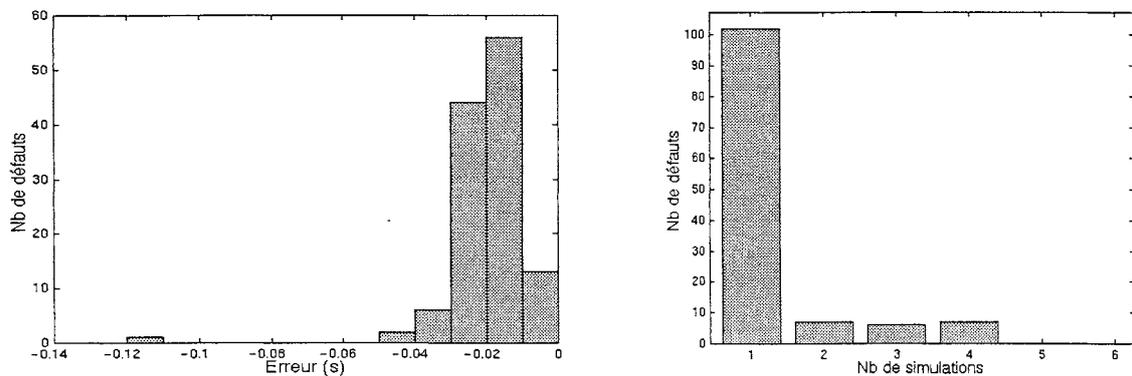
Pour vérifier que la méthode itérative hybride FET accélérée converge plus rapidement vers le TEC, nous l'avons testée sur les quatre réseaux tests. La décroissance minimale de l'énergie critique a été prise égale à 20% de l'énergie totale injectée pendant le défaut ($\alpha=0.8$), ceci afin d'assurer une convergence rapide. Les conditions d'essais sont les mêmes que celles utilisées dans les essais de la méthode originale.

Résultats des essais



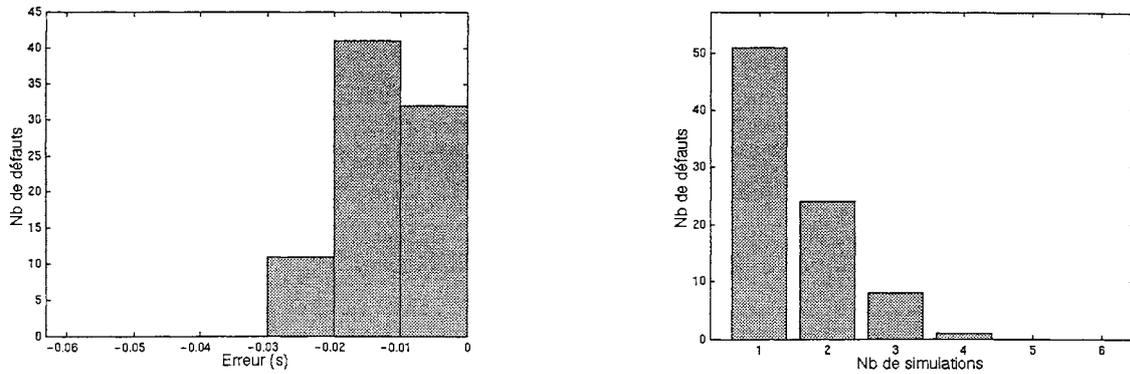
erreur minimum : -0.030s Nb maximum de simulations : 4 Nb total de défauts : 65

Figure IV-18 : Résultats des essais avec le réseau New-England



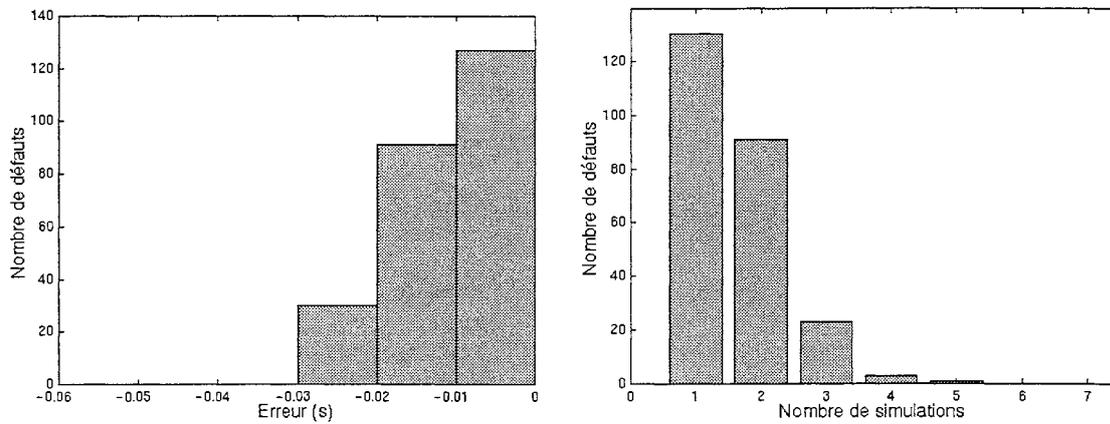
erreur minimum : -0.116s Nb maximum de simulations : 4 Nb total de défauts : 122

Figure IV-19 : Résultats des essais avec le réseau Iowa State



erreur minimum : -0.028s Nb maximum de simulations : 4 Nb total de défauts : 84

Figure IV-20 : Résultats des essais avec le réseau IEEE20



erreur minimum : -0.026s Nb maximum de simulations : 5 Nb total de défauts : 248

Figure IV-21 : Résultats des essais avec le réseau colombien

Analyses des essais

La méthode itérative hybride FET est un peu moins précise lorsqu'on impose une diminution minimum pour l'énergie critique. Cela est surtout sensible avec le réseau New-England où il n'y avait pas d'erreur inférieure à 0.025s précédemment, alors qu'ici 15.4% des erreurs sont comprises entre -0.025s et -0.050s. Pour les autres réseaux, la différence est peu importante. En fait, la précision ne se dégrade pas trop, bien qu'une forte diminution soit imposée. L'erreur n'est jamais inférieure à -0.04s comme avec la méthode itérative hybride non accélérée, sauf pour un cas que l'on a déjà identifié précédemment.

En ce qui concerne la rapidité de la convergence, le nombre de simulations nécessaires pour trouver le TEC ne dépasse jamais cinq. On a donc résolu les problèmes de convergence rencontrés avec la méthode originale. De plus, le nombre de simulations nécessaires a globalement diminué. Cela est surtout vrai pour le réseau New-England où 82% des TEC sont trouvés en moins de trois simulations, alors qu'auparavant il n'y en avait que 52%. Il y a aussi une amélioration avec le réseau colombien où 89% des TEC sont trouvés en moins de trois

simulations, au lieu de 78% auparavant. La progression est beaucoup moins nette avec les autres réseaux, mais la convergence était déjà très bonne avec la méthode originale.

La méthode que nous avons créée permet donc d'obtenir des résultats assez précis avec un minimum de simulations. Dans les essais ci-dessus, nous avons pris l'énergie critique maximum égale à $0.8 \times \text{Energie totale}$ ($\alpha=0.8$). Nous avons choisi cette valeur car elle assure un bon compromis entre la rapidité et la précision. Si on veut une précision plus importante, il suffit d'augmenter la valeur de α . Le choix de cette valeur dépend de la rapidité et de la précision désirées.

IV.4.4 La méthode itérative hybride FET EEAC

Nous avons vu dans le chapitre II que la méthode hybride EEAC n'est pas une méthode fiable car elle ne peut pas s'appliquer à tous les cas de figure. Il faut que le réseau puisse se décomposer en deux groupes de machines. Cependant, on a vu aussi qu'elle donne des résultats parfois plus précis que les méthodes PEBS et hybride FET. De plus, cette méthode a l'avantage de fournir des résultats qui sont toujours optimistes ou légèrement conservatifs, ce qui est une propriété indispensable pour qu'une méthode d'analyse soit utilisable dans notre méthode itérative. Nous avons donc eu l'idée de l'associer à la méthode hybride FET pour trouver plus rapidement le TEC. L'organigramme de la méthode qui en résulte est présenté dans la figure IV-22. Cette méthode sera appelée par la suite méthode itérative hybride FET EEAC

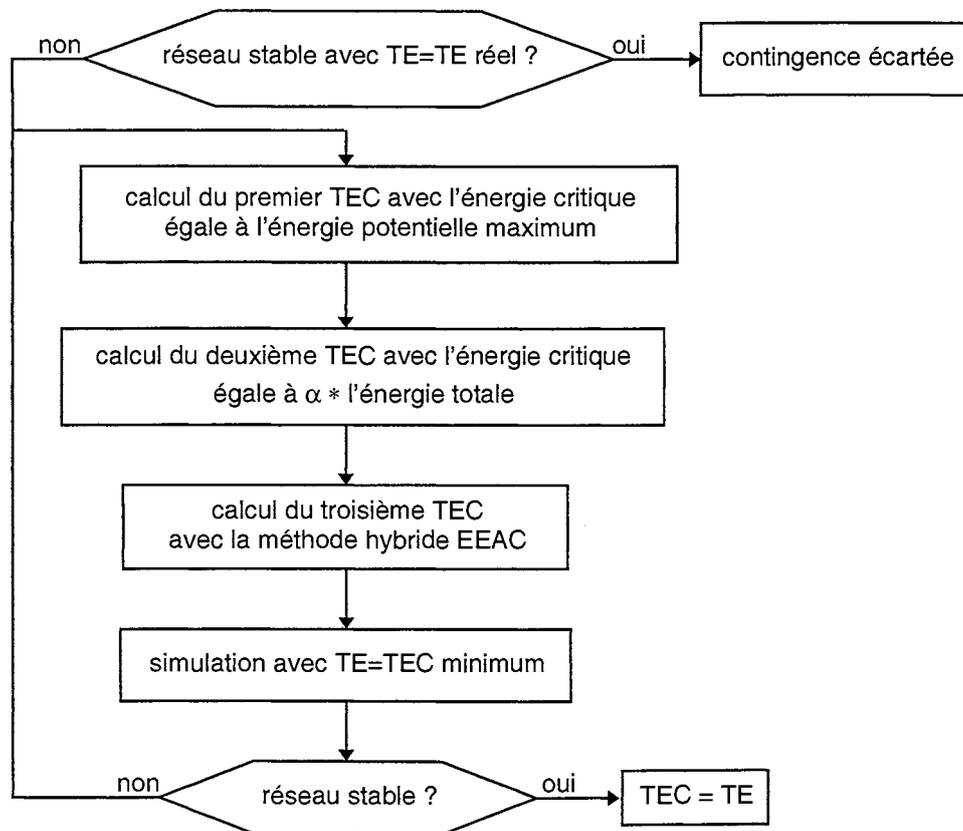


Figure IV-22: Organigramme de la méthode itérative hybride FET EEAC

Description de la méthode

Le TEC est calculé de trois façons différentes avec cette méthode :

1. Le premier TEC est calculé en utilisant la méthode hybride FET, et en considérant l'énergie critique égale à l'énergie potentielle maximum.
2. Le deuxième TEC est aussi obtenu en utilisant la méthode hybride FET, mais en imposant une diminution minimum pour l'énergie critique. Cette diminution est calculée à partir de l'énergie totale injectée dans le réseau.
3. Le troisième TEC est calculé à l'aide de la méthode hybride EEAC. La décomposition des machines en deux groupes est effectuée de la même manière que dans le chapitre II.

Une fois le calcul de ces trois TEC terminé, on réalise une simulation numérique en prenant le TE égal au TEC le plus petit. Si le réseau est stable, le TEC est considéré trouvé et égal au TE.

Contrairement à la méthode hybride FET, la méthode hybride EEAC ne permet pas toujours de converger vers le TEC réel. En effet, le TEC estimé avec la méthode hybride EEAC dépend de la composition du groupe des machines critiques. Si celui-ci n'est pas modifié d'une simulation à l'autre, le TEC estimé ne diminuera pas. Ainsi, il peut être correctement estimé, mais s'il est légèrement supérieur au TEC réel, le réseau restera instable quel que soit le nombre de simulations effectuées car les machines critiques seront toujours les mêmes. Ce phénomène est parfaitement illustré avec le défaut [65] [65-38] du réseau IEEE20. Les résultats que l'on obtient si on n'utilise que la méthode hybride EEAC dans notre méthode itérative sont montrés dans le tableau IV-5. La première simulation est réalisée avec $TE=TEC+0.25s$.

	1 ^{ère} simulation	2 ^{ème} simulation	3 ^{ème} simulation
TEC estimé (s)	0.301s	0.22s	0.22s

Tableau IV-5 : Convergence avec la méthode hybride EEAC

Le TEC réel de ce défaut est égal à 0.217s. On remarque que la convergence est très rapide puisqu'il faut deux simulations seulement pour obtenir un TEC précis. Ceci est remarquable puisque nous sommes dans un cas de figure où les méthodes hybride FET et hybride EEAC échouent, ce qui explique que le premier TEC estimé soit si élevé. Par contre, si le TEC estimé est bon dès la deuxième simulation, il ne diminue pas plus lors des simulations suivantes. Il reste légèrement supérieur au TEC réel. Le TEC estimé reste inchangé d'une simulation à l'autre car le groupe des machines critiques n'évolue pas. La méthode hybride EEAC ne peut donc pas être utilisée seule dans notre méthode itérative car elle ne finit pas par donner des résultats toujours légèrement pessimistes comme la méthode hybride FET. Avec la méthode hybride FET, le TEC estimé finit toujours par devenir inférieur au TEC réel grâce au fait que l'énergie

totale injectée dans le réseau n'est pas totalement convertie en énergie potentielle, même lorsque le réseau est stable.

Avec la méthode itérative hybride FET EEAC, la méthode hybride FET prend la relève lorsque le TEC ne diminue plus avec la méthode hybride EEAC, comme le montre le tableau IV-6 qui présente les résultats obtenus avec la méthode itérative hybride FET EEAC pour le même défaut et les mêmes conditions d'essais que dans le tableau IV-5.

	1 ^{ère} simulation	2 ^{ème} simulation	3 ^{ème} simulation
TEC estimé (s)	0.301	0.22	0.2

Tableau IV-6 : Convergence avec la méthode itérative hybride FET EEAC

La combinaison de la méthode hybride FET avec la méthode hybride EEAC permet donc d'accélérer la convergence dans certain cas. Les tableaux IV-7 et IV-8 montrent un exemple où la convergence est fortement accélérée grâce à cette combinaison. Le défaut étudié est le défaut [25] [25-2] du réseau New-England. Son TEC est égal à 0.174s.

	1 ^{ère} simulation	2 ^{ème} simulation	3 ^{ème} simulation	4 ^{ème} simulation
TEC estimé (s)	0.244	0.208	0.185	0.167

Tableau IV-7 : Convergence avec la méthode itérative hybride FET accélérée

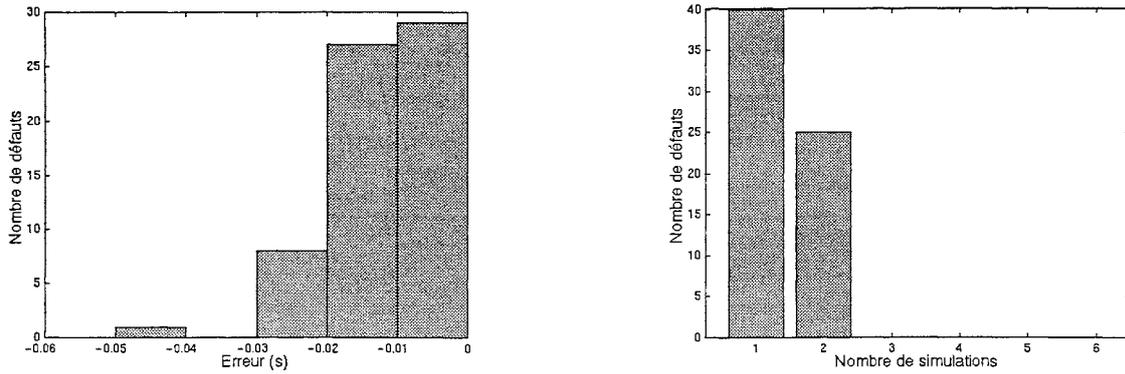
	1 ^{ère} simulation
TEC estimé (s)	0.171

Tableau IV-8 : Convergence avec la méthode itérative hybride FET EEAC

L'utilisation de la méthode hybride EEAC permet de diminuer le nombre de simulations nécessaire pour trouver le TEC de 4 à une seule simulation. Ceci représente un gain de temps important.

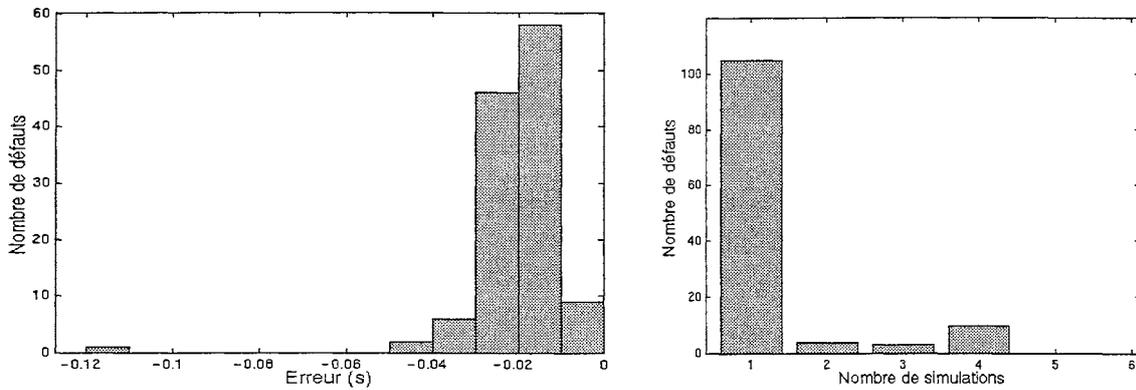
La méthode que nous avons mise au point permet donc de tirer partie de la rapidité de la convergence avec la méthode hybride EEAC, tout en contournant la grande imprécision dont fait l'objet parfois cette méthode. Pour valider la méthode itérative hybride FET EEAC, nous l'avons testée dans les mêmes conditions que les autres méthodes itératives étudiées jusqu'ici, et avec les mêmes réseaux électriques.

Résultats des essais



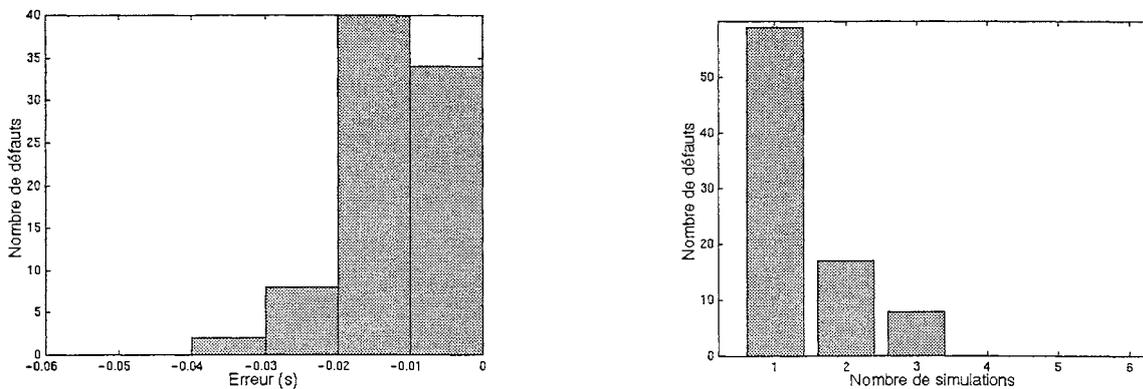
erreur minimum : -0.043s Nb maximum de simulations : 2 Nb total de défauts : 65

Figure IV-23 : Résultats des essais avec le réseau New-England



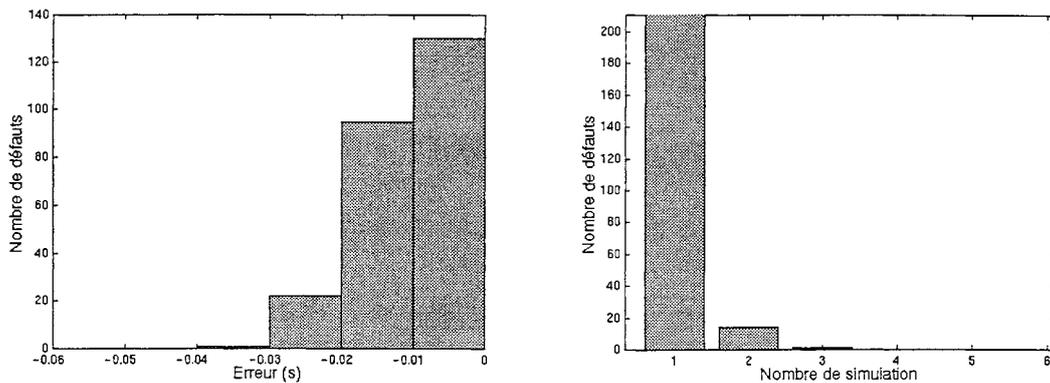
erreur minimum : -0.116s Nb maximum de simulations : 4 Nb total de défauts : 122

Figure IV-24 : Résultats des essais avec le réseau Iowa State



erreur minimum : -0.036s Nb maximum de simulations : 3 Nb total de défauts : 84

Figure IV-25 : Résultats des essais avec le réseau IEEE20



erreur minimum : -0.034s Nb maximum de simulations : 3 Nb total de défauts : 248

Figure IV-26 : Résultats des essais avec le réseau colombien

Analyse des essais

Les résultats ci-dessus montrent que l'utilisation de la méthode hybride EEAC permet de converger plus rapidement vers le TEC. Cela est surtout sensible pour les réseaux New-England et colombien. Pour le réseau New-England, le nombre maximum d'itérations nécessaires pour trouver le TEC passe de 4 à 2. De plus, une seule simulation suffit pour obtenir le TEC dans 61.5% des cas au lieu de 11% des cas avec la méthode itérative hybride FET accélérée. Le même phénomène est observé avec le réseau colombien. Une seule simulation suffit pour trouver le TEC dans 94% des cas avec la méthode itérative hybride FET EEAC au lieu de 52% des cas avec la méthode itérative hybride FET accélérée, et le nombre maximum d'itération passe de 4 à 3. Ces améliorations viennent du fait que la méthode hybride EEAC fonctionne particulièrement bien pour ces deux réseaux. Pour les autres réseaux, l'amélioration est moins nette.

La précision de cette méthode itérative hybride reste correcte puisque l'erreur n'est jamais supérieure à 0.043s en valeur absolue (au lieu de 0.04s pour les deux autres méthodes itératives hybrides) à part un cas où elle est égale à -0.116s comme pour les autres méthodes itératives. En général, la précision de la méthode itérative hybride FET EEAC est sensiblement la même que la précision de la méthode itérative hybride FET accélérée.

L'utilisation de la méthode hybride EEAC en combinaison avec la méthode hybride FET permet donc d'accélérer la convergence vers le TEC, tout en gardant une bonne précision.

IV.5 CONCLUSION

Nous avons, dans ce chapitre, étudié plus en détail les méthodes hybrides. Dans un premier temps, nous nous sommes proposés de diminuer le temps de calcul lié à la simulation numérique en réduisant la période d'intégration des équations différentielles. Pour cela, nous avons mis au point des critères d'arrêts qui détectent rapidement la stabilité ou l'instabilité du réseau. Nous avons ensuite créé une méthode itérative de recherche utilisant les méthodes

hybride FET et hybride EEAC. Cette méthode, appelée méthode itérative hybride EEAC, permet de trouver le TEC précisément et avec peu de simulations.

Comme cette méthode utilise une procédure itérative, elle nécessite plusieurs simulations numériques pour trouver le TEC. Bien que l'utilisation des méthodes hybride FET et EEAC permettent une convergence rapide vers le TEC, cette méthode demande beaucoup de calculs. Cependant, sa lenteur est à relativiser. La détermination de la stabilité est effectuée à partir de la simulation complète de la trajectoire avec le TE égal au TE réel. Grâce aux critères d'arrêt, cette simulation ne demande pas beaucoup de calculs. De plus, la procédure itérative n'est utilisée que pour estimer le TEC des contingences trouvées instables. Comme la plupart des contingences sont normalement stables si le réseau est dans un fonctionnement normal, la procédure itérative est utilisée dans peu de cas. L'analyse de la sécurité dynamique est donc peu ralentie par cette procédure.

La méthode itérative hybride FET EEAC représente donc un bon compromis entre la fiabilité et la précision d'une part, et la rapidité d'autre part.

CHAPITRE V

FILTRAGE DES CONTINGENCES AVEC LA METHODE PEBS INDIVIDUELLE ET LA METHODE ITERATIVE HYBRIDE

CHAPITRE V

FILTRAGE DES CONTINGENCES AVEC LA METHODE PEBS INDIVIDUELLE ET LA METHODE ITERATIVE HYBRIDE

Tous les travaux qui ont été effectués jusqu'ici dans le cadre de cette thèse ont été réalisés en utilisant la modélisation classique et les hypothèses simplificatrices généralement utilisées dans l'analyse de la stabilité transitoire. Nous allons, dans ce chapitre, vérifier si cette modélisation et ces hypothèses sont valables. En fonction des résultats de cette étude, nous verrons les modifications à apporter aux méthodes PEBS individuelle et itérative hybride.

V.1 ETUDE DE LA VALIDITE DE LA MODELISATION CLASSIQUE

La plupart des études effectuées jusqu'à aujourd'hui sur l'analyse de la stabilité transitoire ont utilisé la modélisation classique (voir § I.3.3.1.b). Cette modélisation est très simplifiée, ce qui permet de réduire nettement le temps de simulation numérique. Cependant, l'introduction de toute simplification dans la modélisation se traduit forcément par une perte de précision lors de la simulation numérique. Nous allons donc vérifier que la modélisation classique donne des résultats suffisamment précis pour être exploitables.

V.1.1 Présentation de la modélisation détaillée utilisée

Avant de présenter la modélisation détaillée utilisée pour les tests, nous allons rappeler les hypothèses simplificatrices faites dans la modélisation classique. Ces hypothèses sont :

- La puissance mécanique en entrée des générateurs est considérée constante.
- L'amortissement est négligé dans l'équation de mouvement des machines.
- Les générateurs sont représentés par une FEM constante située derrière la réactance transitoire d'axe direct.
- Les charges sont considérées comme des impédances constantes. La matrice Y_{bus} peut ainsi être réduite aux noeuds internes des générateurs.
- Les dispositifs de contrôle et de réglage ne sont pas pris en compte dans la modélisation.

Toutes ces hypothèses permettent d'obtenir une modélisation très simple avec seulement deux variables d'état par machine. Cependant, les résultats ne sont valables, avec ce modèle, que sur une courte période. En général, ils sont considérés valables sur la première oscillation, c'est-à-dire sur les deux ou trois premières secondes. C'est ce que nous allons vérifier ici.

Pour effectuer cette étude de validité, il nous faut utiliser un modèle plus détaillé qui donne des résultats suffisamment précis. Si les deux premières hypothèses peuvent être considérées correctes car la période de simulation est très courte, cela n'est pas forcément le cas pour les trois autres. Nous n'étudierons pas l'influence des dispositifs de contrôle et de réglage. En effet, ceux-ci ne peuvent avoir qu'une influence positive sur la stabilité du réseau s'ils sont bien réglés. Une contingence trouvée stable sans ces dispositifs ne peut être que stable avec. Comme la prise en compte de ces dispositifs introduit beaucoup d'équations différentielles supplémentaires dans la modélisation du réseau, nous ferons d'abord une étude de stabilité transitoire sans ces dispositifs pour écarter rapidement les contingences fortement stables. Puis, nous ferons une seconde étude avec ces dispositifs pour les contingences trouvées instables dans la première étude. Ainsi, seules les contingences véritablement instables seront retenues pour une étude de stabilité transitoire approfondie.

Nous n'étudierons donc que l'influence de la modélisation des machines et des charges sur la précision des résultats. Pour la modélisation détaillée, le modèle utilisé pour les générateurs sera le modèle à deux axes et six variables d'état [KUN-94]. Sa précision est largement suffisante pour les premières secondes de simulation. Quant aux charges, elles seront à courant constant. Les puissances actives et réactives absorbées seront proportionnelles à la tension ($P=P_0 \cdot V$, $Q=Q_0 \cdot V$), et non plus au carré de la tension comme c'était le cas avec les charges à impédance constante. L'utilisation de ce type de charge est recommandée [KUN-94] lorsqu'on ne connaît pas précisément les charges, ce qui est notre cas.

V.1.2 Test de la modélisation classique

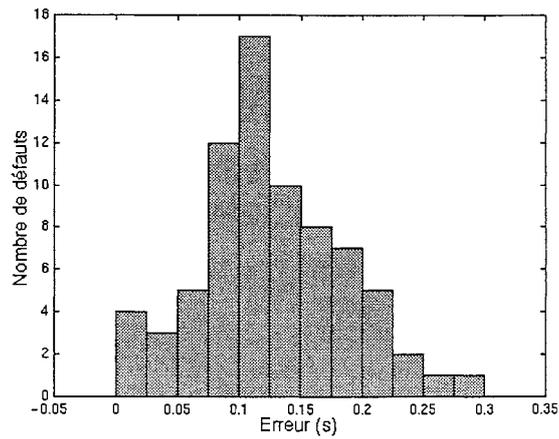
Les essais ont été réalisés à l'aide d'un programme de simulation numérique développé au sein du laboratoire. Ce programme a été développé à partir du logiciel de calcul MATLAB. Il permet d'utiliser différents niveaux de modélisation pour les éléments du réseau. Les essais ont été effectués sur deux réseaux électriques : le réseau New-England et le réseau Colombien. Ils ont consisté à comparer les TEC obtenus avec trois types de modélisation :

- Le premier type de modélisation utilise le modèle classique.
- Le deuxième type utilise un modèle à 6 variables d'état pour les générateurs et les charges sont considérées comme des impédances constantes.
- Le troisième type utilise un modèle à 6 variables d'état pour les générateurs et les charges sont à courant constant.

Les conditions d'essais sont les mêmes que celles qui ont été utilisées dans le chapitre II.

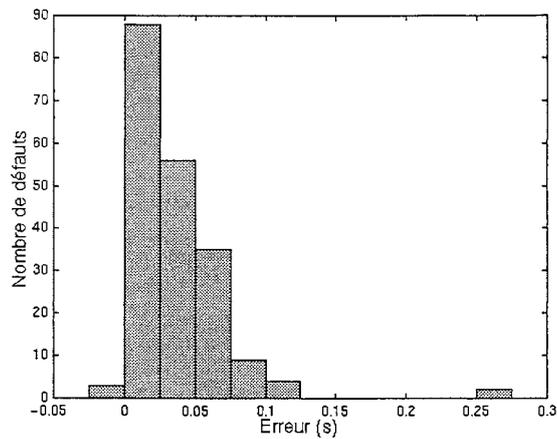
Comparaison des types de modélisation 1 et 3

Les résultats sont présentés sous forme d'histogramme. L'erreur est égale à la différence entre le TEC obtenu avec le type 1 de modélisation et le TEC obtenu avec le type 3.



Erreur minimum = 0.016s Erreur maximum = 0.278s Nombre total de défauts : 75

Figure V-1 : Résultats des tests avec le réseau New-England

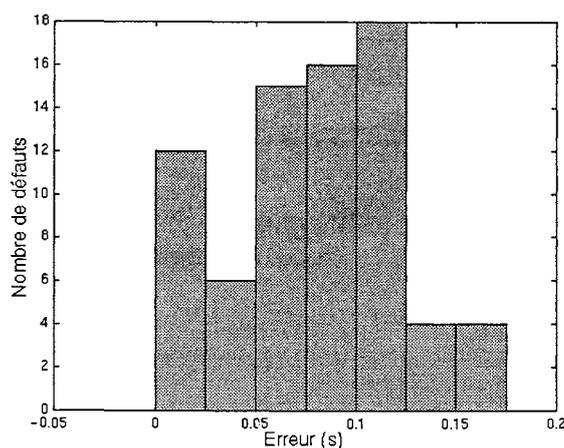


Erreur minimum = -0.033s Erreur maximum = infini Nombre total de défauts : 199

Figure V-2 : Résultats des tests avec le réseau colombien

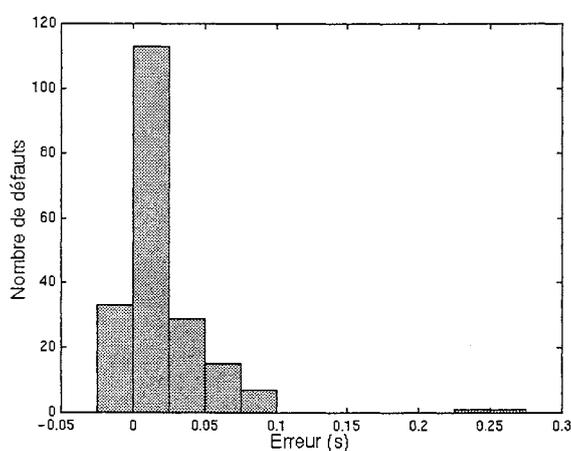
Comparaison des types de modélisation 2 et 3

L'erreur est égale à la différence entre le TEC obtenu avec le type 2 de modélisation et le TEC obtenu avec le type 3.



Erreur minimum = 0.005s Erreur maximum = 0.174s Nombre total de défauts : 75

Figure V-3 : Résultats des tests avec le réseau New-England



Erreur minimum = -0.036s Erreur maximum = 0.252s Nombre total de défauts : 199

Figure V-4 : Résultats des tests avec le réseau colombien

Analyse des résultats

Les résultats ci-dessus montrent que l'on peut obtenir des différences importantes suivant le type de modélisation utilisé. L'erreur est souvent importante avec la modélisation classique. Elle dépasse fréquemment les 0.1s, surtout avec le réseau New-England. Deux défauts sont mêmes trouvés toujours stables avec la modélisation classique alors que leurs TECs sont égaux à 0.249s et 0.231s avec la modélisation de type 3 (les erreurs correspondantes à ces deux cas sont notées erreurs infinies dans la figure V-2). De plus, cette erreur est quasiment toujours positive, ce qui est très gênant puisque des défauts instables peuvent être estimés très stables avec la modélisation classique.

La modélisation de type 2 donne des résultats plus précis, mais l'erreur peut encore être très importante (>0.15s). Pour obtenir une bonne estimation de la stabilité du réseau et du TEC, il est donc nécessaire d'utiliser une modélisation de type 3. Cela signifie qu'il faut utiliser une

modélisation détaillée pour les générateurs, mais aussi pour les charges. Une telle modélisation nécessite beaucoup de calculs, mais est nécessaire si on ne veut pas mettre en danger la stabilité du réseau.

V.1.3 Validité des études de stabilité réalisées sur la première oscillation

Une autre simplification est systématiquement utilisée dans les études de stabilité transitoire. Il s'agit d'étudier la stabilité des réseaux seulement sur la première oscillation. On estime que si le réseau est stable sur la première oscillation, il le sera sur les suivantes. Cela permet de réduire nettement la période de simulation, mais a priori rien ne garantit que cette hypothèse soit valable. En effet, la trajectoire du système peut très bien sortir du domaine de stabilité dans une autre direction que celle de la première oscillation. C'est ce que nous avons vérifié avec le défaut [3] [3-1] du réseau Iowa State. Nous voyons sur la figure V-5 que la machine instable perd la stabilité sur la deuxième oscillation. La simulation a été réalisée avec la modélisation classique, et avec le TE égal au TEC sur la première oscillation moins 0.01s (TE=0.283s).

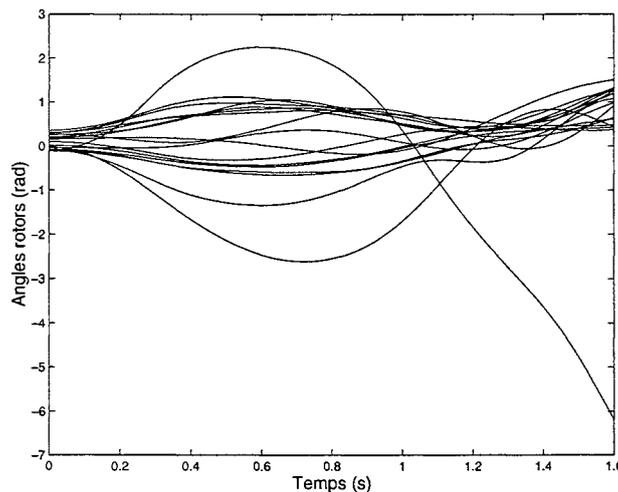


Figure V-5: Angles rotors pour le défaut [3] [3-1] du réseau Iowa State

Le TEC calculé sur la première oscillation et qui était égal à 0.293s n'est donc pas le vrai TEC. Le TEC trouvé en prenant en compte les deux premières oscillation est égal à 0.205s. La différence entre ces deux TEC est égale à 0.088s, ce qui n'est pas négligeable.

Parmi les quatre réseaux tests, nous n'avons trouvé que ce défaut où il y a une perte de stabilité d'origine transitoire après la première oscillation. Il existe quelques autres défauts où il y a une perte de stabilité après la première oscillation, mais ces pertes de stabilité sont dues à des oscillations inter-machines. Ce type d'instabilité, qui a pour origine des oscillations inter-machines, sort du cadre de cette thèse.

Il y a donc à priori peu de cas pour lesquels une perte de stabilité multi-oscillations peut se produire. De plus, les essais ont été réalisés avec la modélisation classique qui est plutôt pessimiste puisqu'elle ne prend pas en compte l'amortissement des machines et les dispositifs de contrôle et de réglage. Or, cet amortissement et ces dispositifs contribuent à stabiliser le réseau après la première oscillation. Nous n'avons pas pu vérifier si le réseau Iowa State continue à perdre la stabilité sur la deuxième oscillation pour le défaut [3] [3-1], lorsqu'on prend en compte une modélisation détaillée, car nous ne disposons que des données relatives au modèle classique. Sinon, aucune perte de stabilité multi-oscillations n'a été détectée avec les réseaux New-England et colombien en utilisant la modélisation de type 3.

Les pertes de stabilité multi-oscillations d'origine transitoire sont donc à priori très rares. Il n'est donc pas nécessaire de vérifier la stabilité après la première oscillation, sauf si on veut vraiment une fiabilité égale à 100% dans la détermination de la stabilité.

V.1.4 Conclusion

Les tests réalisés sur la modélisation classique ont montré que son utilisation pouvait entraîner des erreurs importantes. Ces erreurs ont de plus tendance à surestimer le TEC, ce qui est très grave puisque des contingences instables peuvent être trouvées stables. On pourrait contourner ce problème en utilisant une marge d'erreur sur le TEC. Mais cette marge doit être très grande car l'erreur est parfois très importante, ce qui rend complètement inefficace le filtrage.

La modélisation classique ne peut donc pas être utilisée, même pour filtrer rapidement les défauts très stables. De plus, la modélisation doit être détaillée, non seulement pour les générateurs, mais aussi pour les charges. Par contre, il n'est pas forcément nécessaire d'étudier la stabilité après la première oscillation, à moins qu'on veuille une fiabilité rigoureusement égale à 100% dans la détermination de la stabilité transitoire.

V.2 APPLICATION DE LA METHODE PEBS INDIVIDUELLE ET DE LA METHODE ITERATIVE HYBRIDE AVEC UNE MODELISATION DETAILLEE

Nous venons de voir que l'utilisation d'une modélisation détaillée est nécessaire si on veut obtenir des résultats précis. Nous allons étudier ci-dessous les modifications à apporter aux méthodes présentées dans les chapitres III et IV.

V.2.1 Utilisation de la méthode PEBS individuelle avec une modélisation détaillée

V.2.1.1 Modifications à apporter

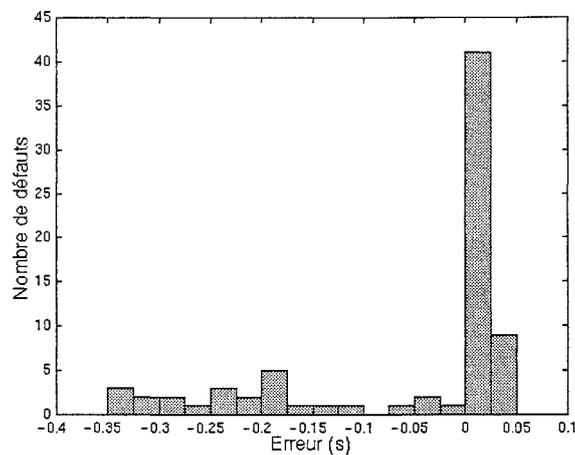
Comme le calcul de l'énergie potentielle est effectué à partir de la trajectoire de défaut, il n'y a pas de modifications à apporter à cette méthode pour qu'elle puisse être appliquée avec une modélisation détaillée. En effet, l'énergie potentielle individuelle se calcule facilement lorsqu'on

connaît la trajectoire du système (voir § I.3.3.1.c), il suffit d'intégrer l'expression I-10 le long de la trajectoire.

V.2.1.2 Test de la méthode PEBS individuelle avec une modélisation détaillée

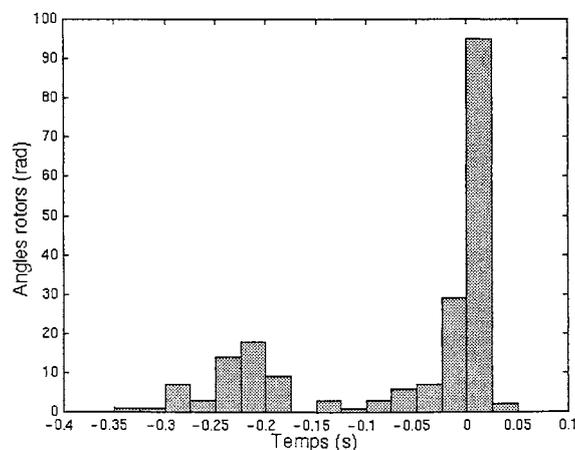
Pour vérifier que la méthode PEBS individuelle donne des résultats corrects avec une modélisation détaillée, nous l'avons testé sur les réseaux New-England et Iowa State avec la modélisation de type III (voir § V.1.2). Ces tests ont consisté à comparer le TEC trouvé avec la méthode PEBS individuelle avec le TEC réel. Les conditions d'essais sont les mêmes que celles qui ont été utilisées dans le chapitre III pour tester cette méthode.

Résultats des essais



Erreur minimum = -0.346s Erreur maximum = 0.044s Nombre total de défauts : 75

Figure V-6 : Résultats des tests avec le réseau New-England



Erreur minimum = -0.340s Erreur maximum = 0.028s Nombre total de défauts : 199

Figure V-7 : Résultats des tests avec le réseau colombien

Analyse des résultats

Comme avec la modélisation classique, le TEC n'est jamais très surestimé puisque l'erreur maximum est égale à 0.044s. Par contre, il est plus souvent fortement sous-estimé. L'erreur est inférieure à 0.1s dans 28% des cas avec le réseau New-England, et dans 29% des cas avec le réseau colombien. Ces sous-estimations posent un problème car environ 25 à 30% des contingences risquent d'être considérées instables alors qu'elles sont fortement stables en réalité. L'efficacité du filtrage avec la méthode PEBS individuelle se trouve alors diminuée.

Le problème vient de certaines machines pour lesquelles l'énergie potentielle ne fait que décroître avec la trajectoire de défaut. L'énergie critique de ces machines est donc estimée nulle, ainsi que le TEC du défaut. En réalité, l'énergie critique de ces machines est supérieure à zéro. L'estimation de l'énergie critique est donc mauvaise pour ces machines avec la trajectoire de défaut. Ce phénomène entraîne une erreur importante sur le TEC.

Cependant, la technique utilisée pour calculer le TEC (voir § III.3.5) permet de ne pas trop perdre de temps lorsque ce phénomène se produit. En effet, dans cette technique, s'il existe une machine perturbée pour laquelle l'énergie potentielle est négative à $t=0.35s$ (temps pour lequel est réalisé l'identification des machines perturbées), le TEC du défaut est considéré nul et la simulation est arrêtée.

La simulation est donc arrêtée très rapidement. De plus, une partie de cette simulation peut être réutilisée pour une étude ultérieure, par exemple une simulation complète de la trajectoire. Ainsi, même si la contingence est déclarée instable au lieu de stable, le temps perdu n'est pas très important.

V.2.2 Utilisation de la méthode itérative hybride avec une modélisation détaillée

V.2.2.1 Modifications à apporter

Contrairement à la méthode PEBS individuelle, la méthode itérative hybride doit subir quelques modifications. En effet, la méthode EEAC n'est pas utilisable avec un autre type de modélisation que la modélisation classique. Le système équivalent d'une machine connectée à un nœud de puissance infinie ne peut être calculé qu'avec la modélisation classique (voir annexe I). Ceci est très embêtant car la méthode itérative hybride, que nous avons proposée dans le chapitre IV, utilise cette méthode. Elle permet de diminuer nettement dans certain cas le nombre de simulations nécessaire pour trouver le TEC. Des techniques ont été proposées pour étendre la méthode EEAC à des modélisations plus détaillées [PAV-94], mais elles sont compliquées et pas toujours très précises. Nous sommes donc obligés de revenir à une méthode itérative hybride basée sur la FET. La méthode FET peut encore être utilisée car on connaît la trajectoire du système. La technique, qui consiste à trouver l'énergie critique en calculant l'énergie potentielle maximum, peut donc être employée.

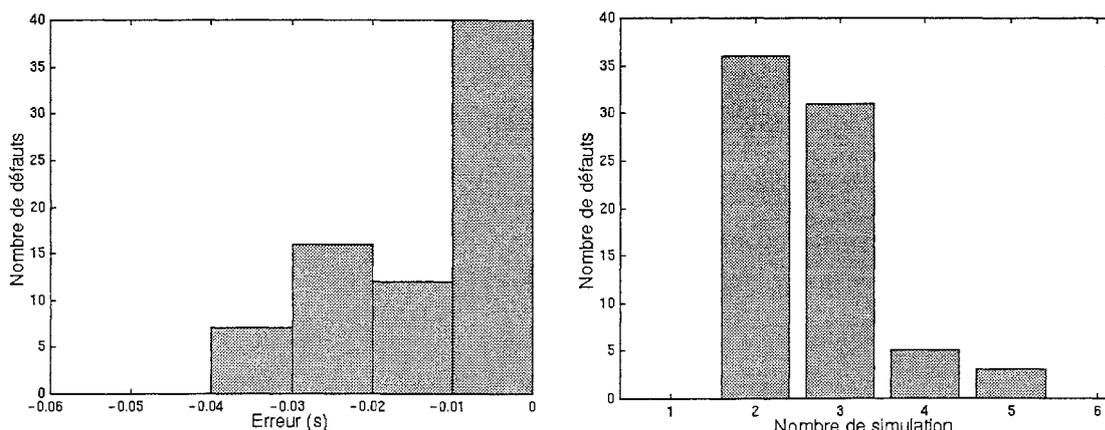
Par contre, notre critère d'instabilité n'est plus valide. En effet, celui-ci utilise une technique qui nécessite de calculer l'énergie potentielle sur une ligne droite passant par le point d'équilibre stable post-défaut (voir § IV.2.2.2). Il est donc nécessaire d'avoir une formulation algébrique pour la FET pour que cette énergie potentielle puisse être calculée. Or, une formulation algébrique qui donne des résultats précis est impossible à obtenir avec une modélisation détaillée.

Nous avons donc dû utiliser un autre critère d'instabilité. Finalement, le critère, qui considère que le réseau a perdu la stabilité lorsqu'un angle rotor dépasse une certaine valeur, nous est apparu comme le plus efficace. En prenant une valeur limite égale à 1.5π radians, nous sommes sûr qu'il n'y aura pas d'erreur dans la détection de l'instabilité. Comme cette valeur est très grande, on pourrait penser que la détection de l'instabilité sera beaucoup plus longue. En réalité, cela n'est pas forcément vrai. Une machine accélère fortement lorsqu'elle perd la stabilité, son angle rotor atteint donc rapidement 1.5π radians. Le fait de prendre une valeur importante retarde donc peu la détection de l'instabilité. De plus, la plupart des contingences sont stables si le réseau est dans un fonctionnement normal. Donc, c'est surtout le critère de stabilité qui doit être efficace si on veut gagner du temps. Comme ce critère est encore utilisable avec une modélisation détaillée puisqu'il ne repose que sur l'observation des angles rotors, l'analyse de la stabilité transitoire est donc peu ralentie par le changement de critère d'instabilité.

V.2.2.2 Test de la méthode itérative hybride FET avec une modélisation détaillée

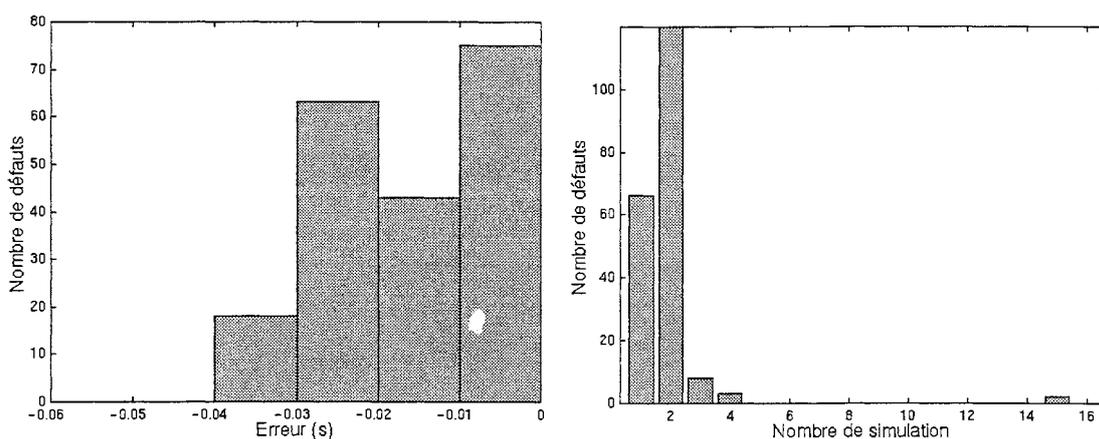
Afin de vérifier que la méthode itérative hybride FET donne des résultats corrects avec une modélisation détaillée, nous l'avons testée sur les deux réseaux pour lesquels nous avons les données complètes (réseau New-England et réseau Colombien). Les essais ont été réalisés avec la modélisation de type 3 (voir § V.1.2). La méthode itérative hybride FET testée est la méthode accélérée car elle permet de converger plus rapidement vers le TEC. Les conditions d'essais étaient les mêmes que celles qui ont été utilisées pour les tests de la méthode itérative hybride avec la modélisation classique. L'erreur sur le TEC est égale à la différence entre le TEC obtenu avec la méthode itérative hybride FET et le TEC réel.

Résultats des essais



Erreur minimum = -0.037s Nb maximum d'itérations = 5 Nb total de défauts : 75

Figure V-8 : Résultats des tests avec le réseau New-England



Erreur minimum = -0.040s Nb maximum d'itérations = 15 Nb total de défauts : 199

Figure V-9 : Résultats des tests avec le réseau colombien

Analyse des résultats

Les résultats sont plutôt précis puisque l'erreur n'est jamais inférieure à $-0.04s$, et la plupart des erreurs sont comprises entre 0 et $-0.025s$: 79% des erreurs pour le réseau New-England et 74% des erreurs pour le réseau colombien.

La détermination du TEC est rapide puisque le TEC est trouvé dans la plupart des cas en moins de quatre simulations seulement : 89% des cas avec le réseau New-England et 98% des cas avec le réseau colombien. Cependant, il existe deux défauts avec le réseau colombien où la convergence est très longue. En effet, il faut 15 simulations pour trouver le TEC pour ces deux défauts. Ce phénomène est dû à la valeur de l'énergie critique qui est très faible. Elle est égale à

0.01pu, alors que l'énergie critique estimée pour $TE=TEC+0.25s$ est égale à 1.7pu. Il s'ensuit donc une convergence très longue malgré la diminution minimum imposée à l'énergie critique.

Cette faiblesse de l'énergie critique a pour origine une perte de stabilité due à des oscillations inter-machines, comme le montre la figure V-10. Cette figure représente les angles rotors des trois machines perturbées par le défaut (en trait continu), et l'angle rotor de la machine instable (en trait pointillé), pour le défaut [122] [122-123] du réseau colombien. Le TE est égal au $TEC+0.01s$ ($TE=0.04s$). On voit bien que l'angle rotor instable augmente d'abord très peu, puis accélère progressivement, ce qui signifie que cette machine perd la stabilité à cause de la présence d'oscillations inter-machines. En fait, il existe des modes d'oscillations inter-machines très peu amortis pour ces deux défauts, car leurs TECs sont égaux à 0.03s.

En dehors de ces deux erreurs qui n'ont pas pour origine un problème de stabilité transitoire, nous pouvons dire que la méthode itérative hybride FET fonctionne très bien avec une modélisation détaillée.

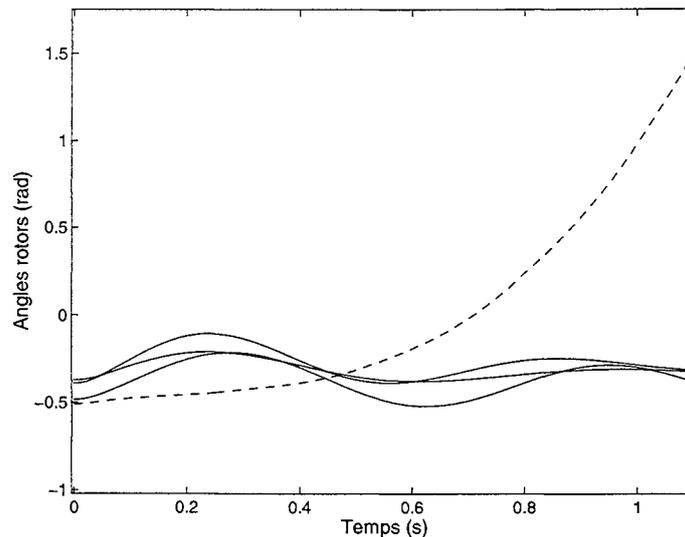


Figure V-10 : Angles rotors pour le défaut [122] [122-123]

V.3 ETUDE DE LA STABILITE MULTI-OSCILLATION AVEC LA METHODE PEBS INDIVIDUELLE ET LA METHODE ITERATIVE HYBRIDE

L'étude de la stabilité sur plusieurs oscillations n'est pas possible avec la méthode PEBS individuelle. L'énergie critique ne peut être calculée que dans la direction de la première oscillation.

En fait, seules deux méthodes permettent de traiter la stabilité multi-oscillation :

- La méthode "closest UEP" (voir chapitre I), mais cette méthode est beaucoup trop lente car elle nécessite le calcul de tous les PEIs de type "col".

- La simulation numérique. Cette méthode permet de connaître la stabilité du réseau sur la période que l'on veut. C'est une méthode très fiable et très précise, mais lente car elle nécessite l'intégration des équations différentielles du modèle.

La méthode itérative hybride, qui repose sur la simulation complète de la trajectoire, permet donc de traiter la stabilité multi-oscillation. Cependant, cela nécessite de simuler la trajectoire sur une grande période de temps (plusieurs secondes), ce qui rend très lente la détermination de la stabilité et le calcul du TEC.

V.4 FILTRAGE AVEC LA METHODE PEBS INDIVIDUELLE ET LA METHODE ITERATIVE HYBRIDE

V.4.1 Introduction

Le filtrage est une partie très importante de l'analyse de la sécurité dynamique car il a pour objectif d'éliminer très rapidement les contingences stables. Comme la majorité des contingences sont fortement stables si le réseau est dans un fonctionnement normal, le filtrage permet de gagner énormément de temps s'il est très rapide. Cependant, aucune méthode n'est suffisamment fiable et rapide à l'heure actuelle pour réaliser ce filtrage (voir chapitre I). Soit ces méthodes ne sont pas assez fiables, soit elles sont trop lentes.

Les deux méthodes que nous avons proposées dans les chapitres III et IV peuvent contribuer à résoudre ce problème, c'est ce que nous allons voir ci-dessous.

V.4.2 Proposition d'un filtrage multi-niveau avec les méthodes PEBS individuelle et itérative hybride

Les méthodes PEBS individuelle et itérative hybride ont des caractéristiques différentes. La méthode PEBS individuelle est très rapide et très fiable, mais elle n'est pas très précise dans la détermination du TEC. La méthode itérative hybride FET est très fiable et précise, mais elle est lente. Ces deux méthodes ne peuvent donc pas remplir les mêmes fonctions.

La méthode PEBS individuelle est très efficace pour déterminer rapidement la stabilité du réseau. Par contre, elle est trop imprécise pour calculer le TEC des contingences instables.

La méthode itérative hybride FET est plus lente pour déterminer la stabilité puisqu'elle nécessite la simulation complète de la trajectoire. Par contre, elle est précise dans le calcul du TEC.

Ces deux méthodes ont donc des caractéristiques complémentaires qui les rendent très attractives pour le filtrage. Nous proposons dans la figure V-11 une stratégie de filtrage utilisant ces deux méthodes.

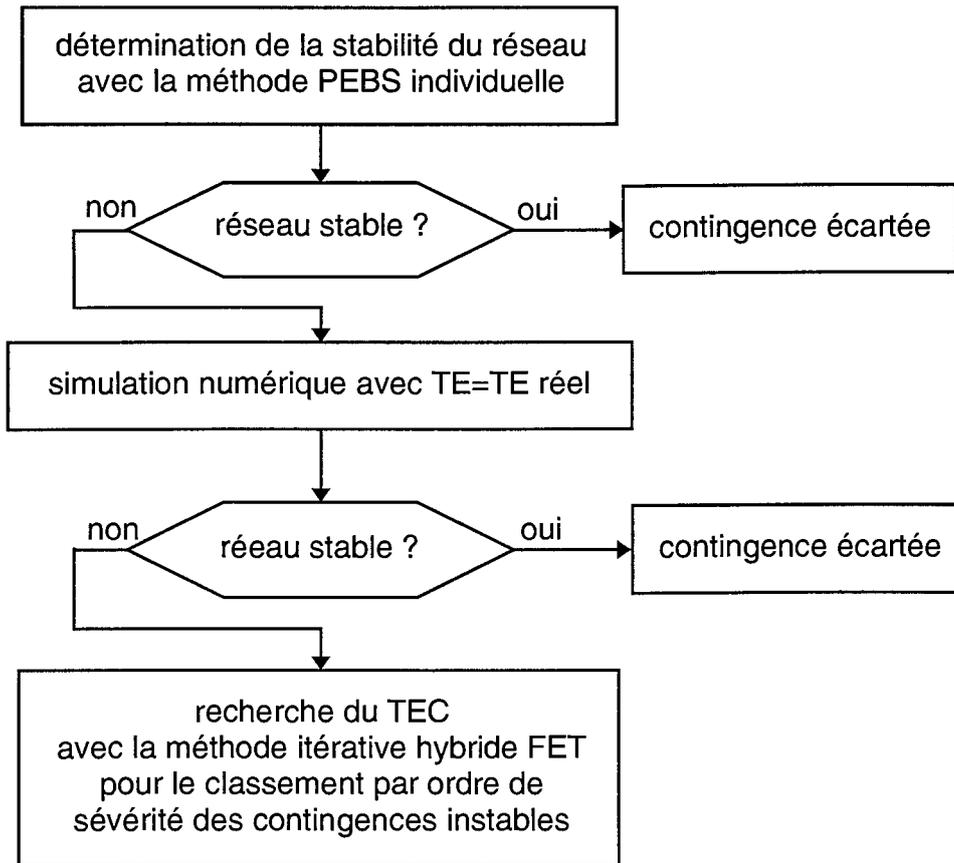


Figure V-11 : Stratégie de filtrage avec les méthodes PEBS individuelle et itérative hybride FET

La première étape de ce filtrage consiste à déterminer très rapidement la stabilité du réseau à l'aide de la méthode PEBS individuelle. Nous avons vu dans le chapitre III que cette méthode permet une détermination rapide et fiable de la stabilité.

La deuxième étape effectue une seconde détermination de la stabilité pour les contingences trouvées instables dans la première étape. Cette détermination s'effectue à l'aide de la simulation complète de la trajectoire avec TE=TE réel. On obtient ainsi une détermination très précise de la stabilité du réseau. Si la contingence est encore trouvée instable à l'issue de cette simulation, on recherche son TEC à l'aide de la méthode itérative hybride FET. Cette méthode permet un calcul assez précis du TEC pour que le classement par ordre de sévérité des contingences instables soit correct.

Dans chacune de ces étapes, on utilise la modélisation détaillée de type 3 : les générateurs sont modélisés avec un modèle à deux axes et six variables d'état et les charges sont à courant constant. Nous avons vu dans le § V.1.1 que les dispositifs de contrôle et de réglage n'ont pas forcément besoin d'être pris en compte. En effet, ceux-ci ne peuvent avoir qu'une influence positive sur la stabilité s'ils sont bien réglés, ce que nous considérons vrai ici.

Le fait de ne pas prendre en compte les dispositifs de contrôle et de réglage permet de gagner beaucoup de temps dans la simulation numérique. En effet, les modèles qui leur sont associés utilisent beaucoup d'équations différentielles. De plus, les constantes de temps relatives à ces équations sont souvent faibles, il faut donc utiliser de petits pas d'intégration dans la simulation numérique afin d'obtenir des résultats corrects. La prise en compte de ces dispositifs nécessite donc beaucoup de calculs supplémentaires.

Généralement, comme la période d'intégration est très courte (quelques secondes), seules les régulations de tensions doivent être prises en compte dans la stabilité transitoire. La vitesse des générateurs n'ayant pas le temps d'évoluer sur une période aussi courte, il est inutile de prendre en compte les régulations de vitesse. Mais, même en prenant en compte que les régulations de tensions, on introduit beaucoup d'équations différentielles dans la modélisation avec, de plus, des constantes de temps très petites.

Pour accélérer le filtrage, nous appliquons donc la méthode PEBS individuelle sans les dispositifs de réglage et de contrôle. On élimine ainsi rapidement les défauts très stables. Par contre, on prend en compte les régulations de tensions dans la simulation complète de la trajectoire. Ainsi, les contingences trouvées instables le sont réellement, ce qui permet de gagner du temps en évitant des recherches inutiles de TEC. On prend aussi en compte ces régulations dans la recherche du TEC afin d'obtenir le TEC réel de la contingence étudiée. Cette recherche du TEC se trouve ralentie, mais ce n'est pas très grave car normalement très peu de contingences sont trouvées instables. On peut donc se permettre de calculer le TEC réel.

Nous avons vu précédemment que la méthode PEBS individuelle pouvait fortement sous-estimer le TEC. Si ce phénomène se produit souvent, il y aura beaucoup de contingences pour lesquelles une simulation complète sera nécessaire. Il peut alors être utile de réaliser une première simulation complète sans les régulations de tensions, afin d'éliminer les contingences fortement stables très rapidement, puis de réaliser une deuxième simulation avec ces régulations pour ne retenir que les contingences vraiment instables. L'opportunité d'une telle stratégie dépend du nombre de cas où le TEC est fortement sous-estimé avec la méthode PEBS individuelle. S'il y a peu de cas, une telle stratégie est inutile et fait perdre du temps.

V.4.3 Analyse de la fiabilité de la stratégie de filtrage proposée

Nous avons vu dans les chapitres III et V que la méthode PEBS individuelle surestime peu le TEC si les oscillations inter-machines sont suffisamment amorties. Dans les tests effectués avec la modélisation classique et la modélisation détaillée, la surestimation du TEC ne dépasse jamais 0.065s. Par conséquent, aucun défaut instable ne peut être considéré stable avec notre stratégie de filtrage si on considère que le réseau est stable lorsque le TEC calculé avec la méthode PEBS individuelle est supérieur au TE réel + 0.075s.

Notre stratégie de filtrage ne nécessite donc pas une grande marge d'erreur pour être très fiable (0.075s semble suffisant). Par conséquent, beaucoup de contingences peuvent être écartées dès la première étape si le TEC n'est pas trop souvent sous-estimé.

La stratégie de filtrage que nous proposons assure donc un filtrage très rapide, tout en étant très fiable.

V.5 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons d'abord étudié la validité de la modélisation classique qui est généralement utilisée dans les études de stabilité transitoire. Cette modélisation est très simplifiée et permet donc des études rapides. Cependant, sa précision est parfois très mauvaise comme l'ont montré les essais comparatifs que nous avons effectués sur plusieurs types de modélisation. En fait, il est nécessaire d'utiliser une modélisation détaillée pour les générateurs et aussi pour les charges si on veut obtenir des résultats suffisamment précis. Par contre, la stabilité n'a pas forcément besoin d'être vérifiée après la première oscillation. Nous avons trouvé très peu de cas où le système perd la stabilité après la première oscillation, sauf s'il y a des modes d'oscillations inter-machines peu amortis, mais ce type de stabilité sort du cadre de cette thèse.

Nous avons ensuite étudié les modifications à apporter aux deux méthodes d'analyse présentées dans les chapitres III et IV pour qu'elles puissent être utilisées avec une modélisation détaillée. La méthode PEBS individuelle ne nécessite aucune modification. Par contre, la méthode itérative hybride doit subir quelques modifications pour être utilisable. En effet, la méthode EEAC ne peut plus être employée avec une modélisation détaillée, ainsi que le critère d'instabilité que nous avons proposé dans le chapitre IV. Il faut donc revenir à une méthode itérative hybride utilisant uniquement la FET. La méthode itérative hybride FET EEAC ne pouvant être utilisée que si la modélisation classique donne des résultats précis pour le réseau étudié. En ce qui concerne l'efficacité de ces deux méthodes, la méthode PEBS individuelle sous-estime plus souvent le TEC avec une modélisation détaillée. Par contre, la méthode itérative hybride FET donne encore de très bons résultats.

Enfin, nous avons proposé une stratégie de filtrage utilisant ces deux méthodes qui sont complémentaires l'une de l'autre. La méthode PEBS individuelle est très rapide mais pas toujours très précise, elle est donc très efficace pour déterminer la stabilité du réseau et écarter les contingences stables. La méthode itérative hybride est précise mais un peu lente, nous l'avons donc utilisée pour le calcul du TEC des contingences trouvées instables.

Bien que cette stratégie de filtrage soit très efficace, elle n'est pas encore assez rapide pour permettre une analyse de la sécurité dynamique en temps réel. En effet, bien que le nombre de simulations numériques soit fortement réduit, elle nécessite tout de même encore beaucoup de calculs pour pouvoir analyser des milliers de contingences en quelques minutes. Cependant, tous ces calculs sont nécessaires si on veut obtenir des résultats fiables et ne pas mettre en

danger la stabilité du réseau. De plus, il n'existe pas d'autres méthodes plus rapides à l'heure actuelle pour filtrer les contingences. Nous avons vu dans le chapitre I que les méthodes basées sur l'intelligence artificielle ne sont pas applicables au réseau de taille réelle.

Notre stratégie de filtrage est un bon compromis entre la rapidité et la fiabilité. Pour que cette stratégie permette de réaliser l'analyse de la sécurité dynamique en temps réel, il faut accélérer les calculs liés à la simulation numérique. Pour cela, de nombreuses études sont effectuées en ce moment, en particulier sur la parallélisation des calculs.

La stratégie de filtrage que nous proposons ici constitue donc un pas supplémentaire vers l'analyse de la sécurité dynamique en temps réel, en permettant de réduire nettement le nombre de calculs. Il s'agit maintenant d'accélérer les calculs liés à la simulation numérique.

CONCLUSION GENERALE
ET PERSPECTIVES

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

L'analyse de la sécurité dynamique en temps réel n'est toujours pas possible à l'heure actuelle faute de méthodes suffisamment rapides et fiables d'étude de la stabilité transitoire. Dans ce contexte, le filtrage des contingences constitue un enjeu très important puisqu'il peut permettre de réaliser l'analyse de la sécurité dynamique en temps réel grâce au temps qu'il permet d'économiser. L'objectif de notre travail a donc été de mettre au point une procédure de filtrage fiable et la plus rapide possible, à partir des méthodes d'analyse de la stabilité transitoire existantes.

Dans un premier temps, nous avons présenté les principales méthodes d'analyse de la stabilité transitoire. Parmi ces méthodes, nous avons retenu les méthodes directes et les méthodes hybrides qui représentent un bon compromis entre la fiabilité et la rapidité. Nous avons écarté les méthodes basées sur l'intelligence artificielle car elles ne sont pas applicables à l'analyse de la stabilité transitoire. Elles nécessitent beaucoup trop de simulations pour l'apprentissage.

Nous avons ensuite testé les méthodes hybrides et directes à l'aide de quatre réseaux tests. Les nombreux essais réalisés ont montré que les méthodes PEBS, hybride FET et hybride EEAC étaient les plus intéressantes. Cependant, ces méthodes nécessitent des améliorations au niveau de la rapidité, de la fiabilité et de la précision pour être applicables au filtrage des contingences. Nous nous sommes alors proposés d'améliorer les méthodes PEBS et hybrides.

Pour la méthode PEBS, nous avons nettement augmenté sa fiabilité en modifiant le calcul du TEC. Nous avons, en outre, mis au point une procédure qui permet d'arrêter très vite la simulation numérique. La détermination de la stabilité d'un réseau est ainsi très rapide et très fiable. Par contre, cette méthode PEBS modifiée est inutilisable pour le calcul du TEC car, dans certains cas, elle le sous-estime beaucoup.

Pour les méthodes hybrides, la fiabilité n'a pas besoin d'être améliorée car elle est déjà très bonne puisque la détermination de la stabilité repose sur la simulation numérique qui est la méthode la plus fiable. Par contre, ces méthodes ne sont pas très rapides et pas toujours très précises dans le calcul du TEC. Comme ces deux caractéristiques ne peuvent pas être améliorées, nous avons utilisé les méthodes hybrides pour accélérer la recherche itérative du TEC. Ainsi, on obtient une méthode itérative qui calcule précisément le TEC avec peu de simulations numériques.

A partir des deux méthodes que nous avons mise au point, nous avons créé une stratégie de filtrage multi-niveau rapide, fiable et précise. La méthode PEBS individuelle est utilisée pour

réaliser un premier filtrage rapide. Ensuite, on réalise un second filtrage très précis avec la simulation numérique complète de la trajectoire. Enfin, on classe par ordre de sévérité les contingences trouvées instables en utilisant la méthode itérative hybride.

Enfin, nous avons aussi étudié l'impact de la modélisation sur la précision des résultats. Nous avons montré que la modélisation classique, généralement utilisée dans les analyses de stabilité transitoire, n'est pas assez précise. Pour obtenir des résultats exploitables, il faut utiliser une modélisation complète. Nous avons alors apporté des modifications aux méthodes PEBS individuelle et hybride FET afin qu'elles puissent être utilisées avec une modélisation complète. Le filtrage que nous avons mis au point devient ainsi applicable à tous les niveaux de modélisation.

PERSPECTIVES

Bien que le filtrage proposé dans cette thèse soit efficace, il n'est pas encore assez rapide pour filtrer en quelques minutes plusieurs milliers de contingences. Pour que cela soit réalisable, il faut accélérer les calculs liés à la simulation numérique. La parallélisation des calculs peut être un moyen efficace.

Nous avons vu que, dans certains cas, la méthode PEBS individuelle sous-estime fortement le TEC. Pour améliorer l'efficacité du filtrage, il faut limiter le nombre de cas où ce phénomène se produit.

Enfin, pour que le filtrage soit applicable à tous les défauts, il conviendrait d'étendre les méthodes d'analyse de la stabilité transitoire aux incidents multiples.

ANNEXES

ANNEXE I

REDUCTION D'UN RESEAU ELECTRIQUE A UN SYSTEME D'UNE MACHINE CONNECTEE A UN NOEUD DE PUISSANCE INFINIE

Nous allons décrire dans cette annexe la procédure à suivre pour réduire un réseau électrique à une machine connectée à un nœud de puissance infinie.

A1.1 LA MODELISATION DU RESEAU

La réduction d'un réseau électrique à un système d'une machine connectée à un nœud de puissance infinie ne peut être réalisée qu'avec la modélisation simplifiée. Les équations d'état pour un système de n machines sont les suivantes avec cette modélisation :

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{\delta}}_i &= \tilde{W}_i \\ M_i \ddot{\tilde{\delta}}_i &= P_{mi} - P_{ei} - \frac{M_i}{M_T} P_{CI} \quad i = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (A1-1)$$

$$\text{Avec } P_{ei} = E_i G_{ii} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n E_i E_j [B_{ij} \sin(\tilde{\delta}_i - \tilde{\delta}_j) + G_{ij} \cos(\tilde{\delta}_i - \tilde{\delta}_j)]$$

Voir le chapitre I (§ I.3.3.1.b) pour la signification des différentes variables.

A1.2 DECOMPOSITION DU RESEAU EN DEUX MACHINES EQUIVALENTES [PAV-94]

Pour décomposer le réseau en deux machines équivalentes, il faut d'abord le décomposer en deux groupes de machines. Un groupe qui réunit les machines faiblement perturbées, et un groupe composé des machines perturbées qui tendent à devenir instables.

Pour déterminer quelles sont les machines critiques et les machines non critiques, on utilise une méthode de rangement appelée méthode CMR ("Critical Machine Ranking"). Cette méthode sera décrite dans le chapitre A1.4.1.

Une fois que le réseau a été décomposé en deux groupes de machines, on remplace chacun de ces deux groupes par une machine équivalente. Cette machine équivalente correspond au centre d'inertie angulaire du groupe. Son angle rotor est égal à :

$$\tilde{\delta} = \frac{1}{M_T} \sum_{i=1}^m M_i \tilde{\delta}_i \quad (A1-2)$$

Les angles $\tilde{\delta}_i$ sont les angles rotors des machines appartenant au groupe. Ce groupe de machines est ici composé de m machines.

M_T est le moment d'inertie de la machine équivalente. Il est égal à : $M_T = \sum_{i=1}^m M_i$.

L'angle d'une machine i est égal à :

$$\tilde{\delta}_i = \tilde{\delta} + \xi_i \quad (A1-3)$$

Avec ξ_i qui est l'angle relatif de la machine i par rapport au centre d'inertie du groupe ($\tilde{\delta}$).

Le mouvement de la machine équivalente est défini par l'équation suivante :

$$M_T \ddot{\tilde{\delta}} = \sum_{i=1}^n (P_{mi} - P_{ei}) \quad (A1-4)$$

Avec P_{ei} , qui est donné par l'équation (A1-5), lorsque la machine i appartient au groupe non critique.

$$P_{ei} = E_i Y_{ii} \cos \theta_{ii} + E_i \sum_{\substack{l \in s \\ l \neq k}} E_l Y_{il} \cos(\xi_i - \xi_l - \theta_{il}) + E_i \sum_{j \in c} E_j Y_{ij} \cos(\tilde{\delta}_s - \tilde{\delta}_c + \xi_i - \xi_j - \theta_{ij}) \quad \forall i \in s \quad (A1-5)$$

Avec s qui est le groupe des machines non critiques, et c qui est le groupe des machines critiques.

$\tilde{\delta}_s$ est le centre d'inertie angulaire du groupe s, et $\tilde{\delta}_c$ est celui du groupe c.

$Y_{ij} \angle \theta_{ij}$ est l'élément ij de la matrice d'admittance réduite.

Lorsque la machine i appartient au groupe critique, P_{ei} est égal à :

$$P_{ei} = E_i Y_{ii} \cos \theta_{ii} + E_i \sum_{\substack{l \in c \\ l \neq i}} E_l Y_{il} \cos(\xi_i - \xi_l - \theta_{il}) + E_i \sum_{j \in s} E_j Y_{ij} \cos(\tilde{\delta}_c - \tilde{\delta}_s + \xi_i - \xi_j - \theta_{ij}) \quad \forall i \in c \quad (A1-6)$$

A1.3 DETERMINATION DU SYSTEME EQUIVALENT D'UNE MACHINE CONNECTEE A UN NOEUD DE PUISSANCE INFINIE ("ONE MACHINE INFINITE BUS SYSTEM") [PAV-94]

A partir des deux machines équivalentes calculées précédemment, on calcule les grandeurs du système OMIB ("One Machine Infinite Bus System").

Son angle rotor est égal à :

$$\tilde{\delta} = \tilde{\delta}_c - \tilde{\delta}_s \quad (A1-7)$$

Son équation de mouvement est égale à :

$$M \ddot{\tilde{\delta}} = P_m - P_e \quad (A1-8)$$

Avec

$$M = \frac{M_c M_s}{M_T}$$

$$M_T = \sum_{i=1}^n M_i$$

$$P_m = \frac{\left(M_s \sum_{k \in c} P_{mk} - M_c \sum_{l \in s} P_{ml} \right)}{M_T}$$

$$P_e = \frac{\left(M_s \sum_{k \in c} P_{ek} - M_c \sum_{l \in s} P_{el} \right)}{M_T}$$

P_e peut être mis sous la forme suivante en utilisant les équations (A1-5) et (A1-6) :

$$P_e = P_c + P_{\max} \sin(\tilde{\delta} - \nu) \quad (\text{A1-9})$$

D'où :

$$M \ddot{\delta} = P_m - \left[P_c + P_{\max} \sin(\tilde{\delta} - \nu) \right] \quad (\text{A1-10})$$

Avec

$$P_c = \frac{M_s}{M_T} \sum_{k \in c} \sum_{l \in c} E_k E_l Y_{kl} \cos \theta_{kl} \cos(\xi_k - \xi_l) - \frac{M_c}{M_T} \sum_{j \in s} \sum_{l \in s} E_j E_l Y_{jl} \cos \theta_{jl} \cos(\xi_j - \xi_l)$$

$$P_{\max} = \sqrt{C^2 + D^2}$$

$$\nu = -\tan^{-1} \frac{C}{D}$$

$$C = \sum_{k \in c} \sum_{j \in s} E_k E_j Y_{kj} \sin \theta_{kj} \sin(\xi_k - \xi_j) + \frac{M_s - M_c}{M_T} \sum_{k \in c} \sum_{j \in s} E_k E_j Y_{kj} \cos \theta_{kj} \cos(\xi_k - \xi_j)$$

$$D = \sum_{k \in c} \sum_{j \in s} E_k E_j Y_{kj} \sin \theta_{kj} \sin(\xi_k - \xi_j) + \frac{M_s - M_c}{M_T} \sum_{k \in c} \sum_{j \in s} E_k E_j Y_{kj} \cos \theta_{kj} \cos(\xi_k - \xi_j)$$

ANNEXE II

DECOMPOSITION DU RESEAU EN DEUX GROUPE DE MACHINES DANS LA METHODE EEAC

Comme nous avons pu le remarquer dans la détermination du système OMIB, la détermination correcte du groupe critique a une très grande importance dans la précision des résultats.

Ce problème de la détermination du groupe des machines critiques est abordé ci-dessous. Nous ne nous intéresserons qu'à la méthode la plus récente, car elle est de loin la plus précise et la plus fiable. Cette méthode s'appelle la méthode CMR ("Critical Machine Ranking").

A2.1 LA METHODE CMR

Cette méthode a été conçue par XUE en 1993 [XUE-93b]. Elle est en fait une méthode de simulation temporelle qui utilise les séries de Taylor pour déterminer l'évolution des angles rotor. Ces séries permettent l'utilisation d'un pas d'intégration plus important et ainsi d'économiser du temps de calcul. Les séries de Taylor utilisées par cette méthode seront décrites dans le paragraphe A2.4.2. Pour la signification des différentes variables utilisées dans la procédure ci-dessous, voir la figure I-8.

La procédure de la méthode CMR est la suivante :

- Détermination des conditions initiales. Ces conditions initiales sont l'angle d'élimination critique (δ_c) et l'angle d'équilibre instable (δ_u) correspondant à un groupe de machines critiques, déterminé à l'aide d'une version modifiée de la méthode CMR. Cette version modifiée est décrite plus loin.
- Calcul de t_c et t_u correspondant aux angles δ_c et δ_u . Pour calculer ces temps, on utilise des séries de Taylor du type "global" (A2-11). Ces séries sont détaillées dans le chapitre A2.4.2.
- Calcul de l'évolution des angles rotor pendant la période de défaut $[0, t_c]$. Pour cela, on utilise des séries de Taylor du type "individuel" (A2-13), détaillées elles aussi dans le chapitre A2.4.2.
- Calcul de l'évolution des angles rotor pendant la période post-défaut $[t_c, t_c+t_u]$, en utilisant toujours des séries de Taylor du type "individuel".
- Classement des machines dans l'ordre décroissant de l'amplitude de leurs angles rotors, pris à $t=t_c+t_u$. Plus une machine a un angle rotor important à t_c+t_u , plus elle est estimée

perturbée et donc plus elle aura de chance d'appartenir au groupe critique. Donc, plus elle sera proche de la tête du classement.

- Grâce au classement des machines effectué précédemment, on constitue les différents groupes critiques possibles. Pour cela, on prend les n premières machines en partant du haut du classement, avec n=1,2,etc. successivement. Pour chaque groupe critique constitué, on calcule le Temps d'Elimination Critique (TEC) correspondant, en utilisant la méthode EEAC. Le groupe critique réel est celui qui fournit le TEC minimum.

A2.2 DETERMINATION DES CONDITIONS INITIALES DE LA METHODE CMR

On utilise une variante de la méthode précédente. Cette méthode a aussi été développée par XUE [XUE-93b].

Elle se décompose en trois étapes.:

- 1°) Pour un défaut donné, calculer l'évolution des angles rotor dans le temps en utilisant des séries de Taylor du type "individuel" (A2-13). Pour effectuer ce calcul, utiliser un grand pas de calcul (par exemple 100 ms), une longue période de défaut (par exemple 1s), et une période post-défaut de 3 s par exemple.

- 2°) Si les machines ne perdent pas le synchronisme, le réseau peut être déclaré fortement stable. Sinon, les machines sont classées dans l'ordre décroissant de l'amplitude de leur angle rotor, obtenu à l'instant où le réseau perd le synchronisme.

- 3°) Pour constituer le groupe critique qui sera utilisé pour déterminer les conditions initiales de la méthode CMR, prendre les machines en tête de classement.

La méthode CMR est une méthode fiable et précise puisqu'elle utilise la simulation temporelle. De plus comme elle utilise un grand pas de calcul grâce aux séries de Taylor, elle est assez rapide.

L'utilisation d'un grand pas de calcul ne nuit pas trop à la précision de la méthode puisque les calculs sont limités à la première oscillation. De plus, on utilise un coefficient corrigeant en partie l'erreur introduite par la troncation des séries de Taylor.

A2.3 LES SERIES DE TAYLOR UTILISEES PAR LA METHODE EEAC [PAV-94]

Ces séries de Taylor sont de deux types. Il y a les séries de Taylor du type "global". Et les séries de Taylor du type "individuel".

A2.3.1 Les séries de Taylor du type "global"

Ces séries sont utilisées pour calculer le temps pour lequel un angle donné est atteint par le système OMIB. Elles sont de la forme suivante :

$$\tilde{\delta}(t) = \tilde{\delta}_0 + \tilde{\delta}^{(1)}t + \frac{1}{2}\tilde{\delta}^{(2)}t^2 + \frac{1}{6}\tilde{\delta}^{(3)}t^3 + \frac{1}{24}\tilde{\delta}^{(4)}t^4 \quad (\text{A2-11})$$

Dans cette expression, les dérivées de $\tilde{\delta}$ d'ordre supérieur à quatre sont négligées.

$\tilde{\delta}_0$ est la valeur de l'angle du système OMIB lorsque $t=0$.

$\tilde{\delta}^{(n)}$ est la valeur de la dérivée n^{ième} de cet angle à $t=0^+$.

Cette expression permet de trouver t analytiquement à partir d'un angle donné. Cependant, le fait de tronquer la série de Taylor introduit une erreur, surtout si $\tilde{\delta}$ est éloigné de $\tilde{\delta}_0$. Pour corriger en partie cette erreur, des facteurs correctifs sont introduits dans la série de Taylor [XUE-88].

L'équation (A2-11) peut être utilisée pour traiter une séquence de perturbations. Cependant, si la perturbation étudiée est une perturbation simple, les dérivées impaires s'annulent et l'équation (A2-11) devient :

$$\tilde{\delta}(t) = \tilde{\delta}_0 + \frac{1}{2}\tilde{\delta}^{(2)}t^2 + \frac{1}{24}\tilde{\delta}^{(4)}t^4 \quad (\text{A2-12})$$

A2.3.2 Les séries de Taylor du type "individuel"

Ces séries de Taylor sont utilisées pour calculer l'évolution des angles et des vitesses rotor. Elles sont égales à :

$$\begin{aligned} \tilde{\delta}_i(t_k + 1) &= \tilde{\delta}_i(t_k) + \tilde{\omega}_i(t_k)\Delta t_k + \tilde{\gamma}_i(t_k)\frac{(\Delta t_k)^2}{2} + \dot{\tilde{\gamma}}_i(t_k)\frac{(\Delta t_k)^3}{6} + \ddot{\tilde{\gamma}}_i(t_k)\frac{(\Delta t_k)^4}{24} \\ \tilde{\omega}_i(t_k + 1) &= \tilde{\omega}_i(t_k) + \tilde{\gamma}_i(t_k)\Delta t_k + \dot{\tilde{\gamma}}_i(t_k)\frac{(\Delta t_k)^2}{2} + \ddot{\tilde{\gamma}}_i(t_k)\frac{(\Delta t_k)^3}{6} \end{aligned} \quad (\text{A2-13})$$

Avec

$$\Delta t_k = t_{k+1} - t_k$$

$\tilde{\delta}_i(t_k)$ qui est l'angle rotor de la machine i à l'instant t_k .

$\tilde{\omega}_i(t_k)$ qui est la vitesse rotor de la machine i à l'instant t_k .

$\tilde{\gamma}_i(t_k)$ qui est l'accélération rotor de la machine i à l'instant t_k .

ANNEXE III

LES RESEAUX TESTS

A3.1 RESEAU NEW-ENGLAND

Ce réseau a beaucoup été utilisé dans les études de stabilité transitoire. Il est composé de 10 machines, 39 nœuds, 34 lignes et 12 transformateurs. Sa topologie est montrée dans la figure A3-1.

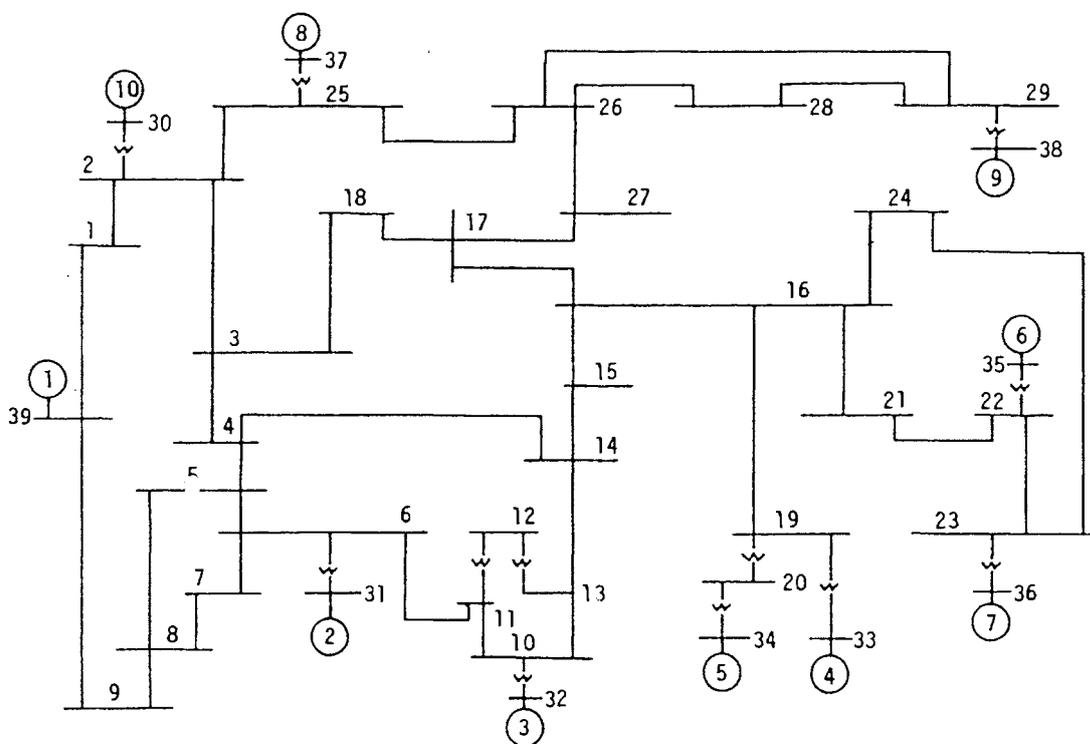


Figure A3-1 : Topologie du réseau New-England

Ce réseau a dans sa configuration initiale une très grosse machine (machine 1) qui est sensée représenter le comportement d'un réseau voisin. Ce générateur a donc un moment d'inertie très grand ($H=500$). Cependant, cette manière de représenter un réseau n'est pas correcte. En effet, ce générateur a une très grande influence sur la stabilité du réseau à cause de sa très grande inertie. Cette influence est bien plus importante que l'influence réelle du réseau qu'il représente. Les transitoires sont en particulier très ralenties. Cette représentation n'est donc pas correcte.

Pour résoudre ce problème, nous avons ignoré le réseau auquel est interconnecté le réseau New-England. Nous avons considéré que la machine 1 est une machine normale semblable à la machine 10. Ainsi, nous obtenons un petit réseau de 10 machines ayant un comportement identique au comportement habituel d'un réseau électrique.

Les données détaillées des générateurs sont indiquées dans le tableau A3-1. Ces données sont fournies pour le modèle à deux axes et six variables d'états. Les données relatives aux réactances subtransitoires ne sont pas disponibles dans la littérature.

Générateur n°	H (sec)	R_a (pu)	X'_d (pu)	X'_q (pu)	X_d (pu)	X_q (pu)	T'_{do} (sec)	T'_{qo} (sec)	X_l (pu)
1	42.0	0	0.031	0.0449	0.1	0.069	10.2	0.0	0.0125
2	30,3	0	0.0697	0.170	0.295	0.282	6.56	1.5	0.035
3	35.8	0	0.0531	0.0876	0.2495	0.237	5.7	1.5	0.0304
4	28.6	0	0.0436	0.166	0.262	0.258	5.69	1.5	0.0295
5	26.0	0	0.132	0.166	0.67	0.62	5.4	0.44	0.054
6	34.8	0	0.05	0.0814	0.254	0.241	7.3	0.4	0.0224
7	26.4	0	0.049	0.186	0.295	0.292	5.66	1.5	0.0322
8	24.3	0	0.057	0.0911	0.290	0.280	6.7	0.41	0.028
9	34.5	0	0.057	0.0587	0.2106	0.205	4.79	1.96	0.0298
10	42.0	0	0.031	0.0449	0.1	0.069	10.2	0.0	0.0125

Tableau A3-1 : Donnée détaillée des générateurs du réseau New-England

A3.2 RESEAU IOWA STATE

Ce réseau, qui est un réseau équivalent du réseau de l'état d'Iowa, est composé de 17 générateurs, 162 nœuds et 284 lignes. La topologie de ce réseau est montrée dans la figure A3.2. Seules les lignes principales sont représentées dans cette figure.

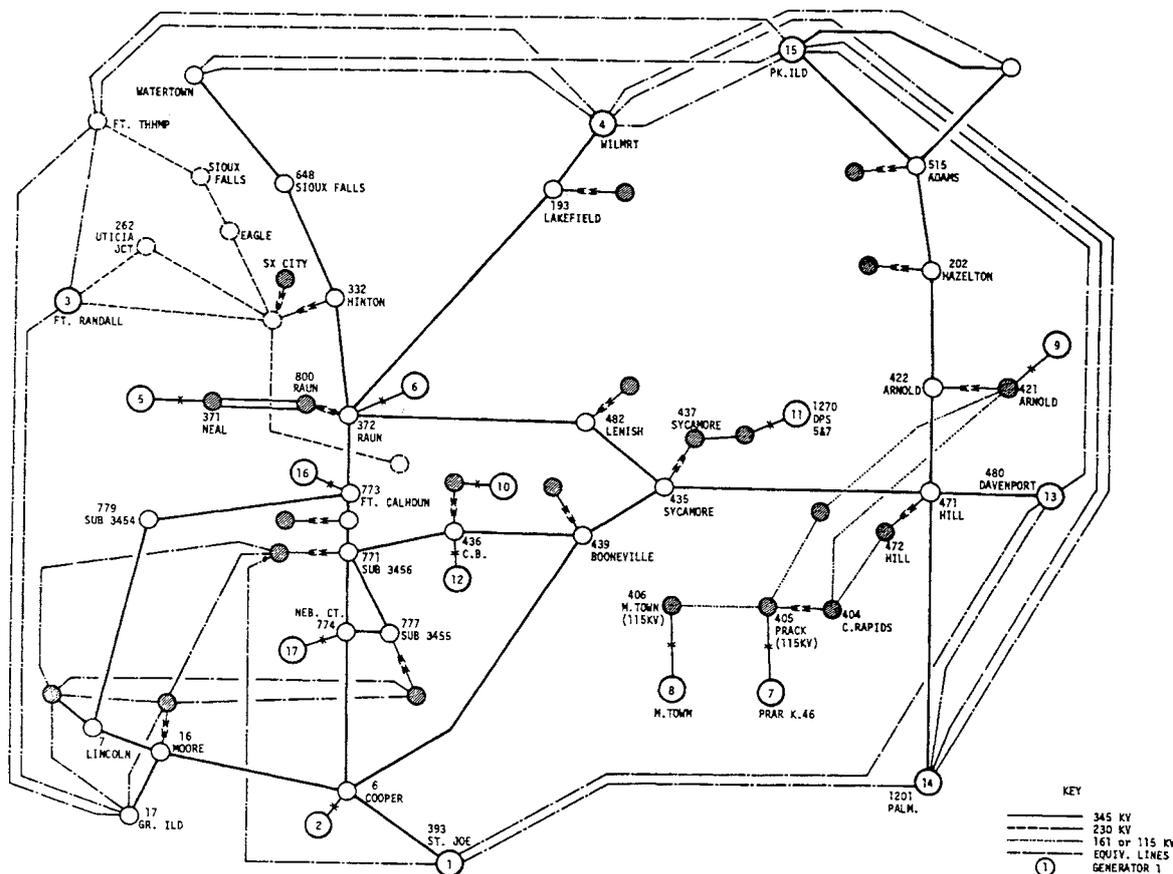


Figure A3-2 : Topologie du réseau Iowa-State

Le tableau A3-2 fournit les données relatives aux machines de ce réseau. Seules les données correspondant à la modélisation classique sont disponibles dans la littérature.

Générateur n°	H (sec)	X'd (pu)	Générateur n°	H (sec)	X'd (pu)
1	100	0.004	10	5	0.177
2	34.56	0.0437	11	11.31	0.1049
3	80	0.01	12	19.79	0.0297
4	80	0.05	13	200	0.002
5	16.79	0.0507	14	200	0.002
6	32.49	0.0206	15	100	0.004
7	6.65	0.1131	16	28.6	0.0559
8	2.66	0.3115	17	20.66	0.0544
9	29.6	0.0535			

Tableau A3-2 : Données simplifiées des générateurs du réseau Iowa-State

A3.3 RESEAU IEEE20

Ce réseau est un réseau test IEEE. Il comporte 20 machines, 118 nœuds et 186 lignes. Sa topologie est représentée dans la figure A3.3.

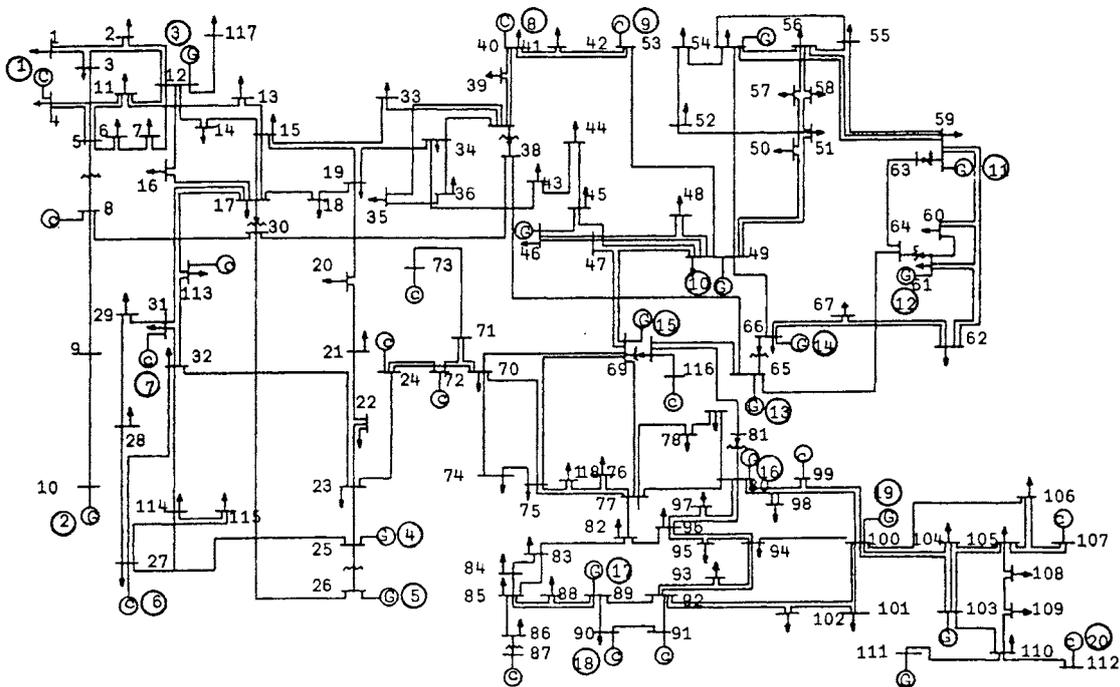


Figure A3-3 : Topologie du réseau IEEE20

Le tableau A3-3 donne les données des générateurs de ce réseau. Seules les données correspondant au modèle classique sont disponibles dans la littérature.

Générateur n°	H (sec)	X'_d (pu)	Générateur n°	H (sec)	X'_d (pu)
1	8	0.0875	11	10	0.14
2	22	0.0636	12	12	0.1167
3	8	0.175	13	20	0.07
4	14	0.1	14	20	0.07
5	26	0.0538	15	30	0.0467
6	8	0.0875	16	28	0.05
7	8	0.0875	17	32	0.0438
8	8	0.0875	18	8	0.0875
9	8	0.0875	19	16	0.0875
10	12	0.1167	20	15	0.0467

Tableau A3-3 : Données simplifiées des générateurs du réseau IEEE20

A3.4 RESEAU COLOMBIEN

Le réseau colombien utilisé pour les simulations est le réseau prévu pour l'année 2002. Ce réseau est composé de 44 générateurs, 148 nœuds et 190 lignes. Sa topologie est montrée dans la figure A3-4.

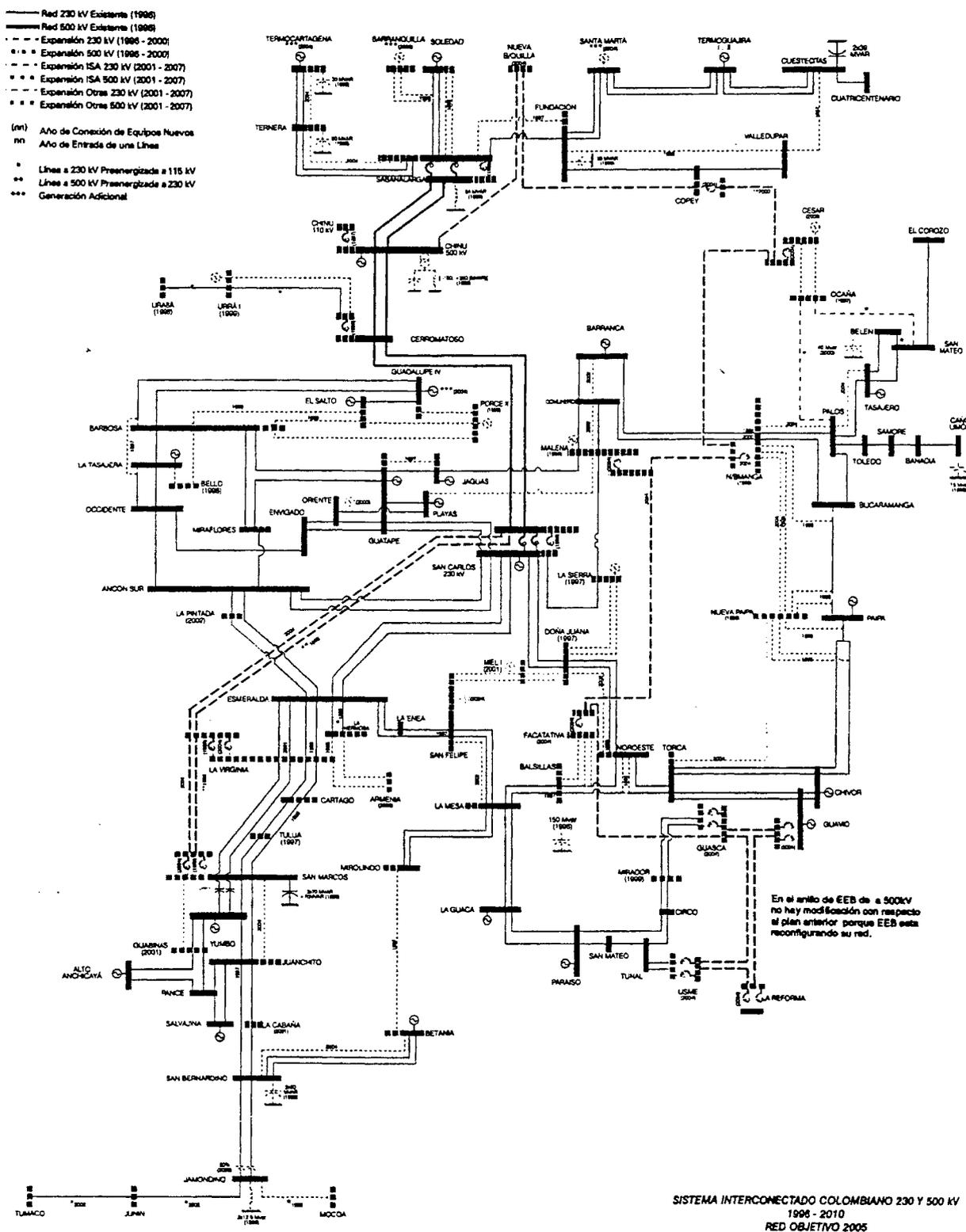


Figure A3-4 : Topologie du réseau colombien

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

- [AND-77] Anderson P. M., et A. A. Fouad. "Power System Control and Stability." *Anies*, Iowa State University Press, 1977.
- [ATH-79] Athay T., R. Podmore, et S. Virmani. "A Practical Method for the Direct Analysis of Transient Stability." IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-98, N°2, Mars-Avril 1979, pp. 573-584.
- [BAL-92] Balu N., T. Bertram, A. Bose, V. Brandwajn, G. Cauley, D. Curtice, A. Fouad, L. Fink, M. G. Lauby, B. F. Wollenberg, et J. N. Wrubel. "On-Line Power System Security Analysis." Proceedings of the IEEE, Vol. 80, N°2, Février 1992, pp.262-280.
- [CAU-93] Cauley G. W., N. J. Balu, et N. G. Hingorani. "On-Line Dynamic Security Assessment : Feasibility Studies." IEEE/NTUA Athens Power Tech Conference, Athens, 5 au 8 Septembre 1993, pp. 275-279.
- [CHAD-96] Chadalavada V., V. Vittal, G. C. Ejebe, G. D. Irisarri, J. Tong, G. Pieper, et M. McMullen. "An On-Line Contingency Filtering Scheme for Dynamic Security Assessment." Article présenté au 1996 IEEE/PES Winter Meeting, Baltimore.
- [CHAU-97] Chauhan S. et M. P. Dave. "Input-features based comparative study of intelligent transient stability assessment." Electric Machines and Power Systems, Vol.25, 1997, pp. 593-605.
- [CHI-87] Chiang H.-D., F. F. Wu, et P. P. Varaiya. "Foundations of Direct Methods for Power System Transient Stability Analysis." IEEE Transactions on Circuits and Systems, Vol. CAS-34, N°2, Février 1987, pp. 160-173.
- [CHI-88] Chiang H.-D., F. F. Wu, et P. P. Varaiya. "Foundations of the Potential Energy Boundary Surface Method for Power System Transient Stability Analysis." IEEE Transactions on Circuits and Systems, Vol. 35, N°6, Juin 1988, pp. 712-728.
- [CHI-89a] Chiang H.-D. "A Theory-Based Controlling UEP Method for Direct Analysis of Power System Transient Stability." IEEE International Symposium on Circuits and Systems, 1989, pp. 1980-1983.
- [CHI-89b] Chiang H.-D., et J. S. Thorp. "The Closest Unstable Equilibrium Point Method for Power System Dynamic Security Assessment." IEEE Transactions on Circuits and Systems, Vol. 36, Septembre 1989, pp. 1187-1220.
- [CHI-92] Chiang H.-D., et L. Fekih-Ahmed. "On the Direct Method for Transient Stability Analysis of Power System Structure Preserving Models." IEEE International Symposium on Circuits and Systems, 1992, pp. 2545-2548.

[CHI-94] Chiang H.-D., F. F. Wu, et P. P. Varaiya. "A BCU Method for Direct Analysis of Power System Transient Stability." IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 9, N°3, Août 1994, pp. 1194-1208.

[CHI-95a] Chiang H.-D., et C. C. Chu. "Theoretical Foundation of the BCU Method for Direct Stability Analysis of Network-Reduction Power System Models with Small Transfer Conductances." IEEE Transactions on Circuits and Systems. I : Fundamental Theory and Applications, Vol. 42, N°5, Mai 1995, pp. 252-265.

[CHI-95b] Chiang H.-D., C.-C. Chu, et G. Cauley. "Direct Stability Analysis of Electric Power Systems using Energy Functions : Theory, Applications, and Perspective." Proceedings of the IEEE, Vol. 83, N°11, Novembre 1995, pp. 1497-1529.

[CHI-98] Chiang H.-D., C.-S. Wang et H. Li. "Development of BCU classifiers for on-line dynamic contingency screening of electric power systems." Paper submitted in the IEEE summer meeting, 1998, PE-349-PWRS-0-06-1998.

[CHU-95] Chung T. S., et F. Da-Zhong. "A Fast Approach to Transient Stability Estimation using an Improved Potential Energy Boundary Surface Method." Electric Power Systems Research, Vol. 34, 1995, pp. 47-55.

[DA-95] Da-Zhong F., T. S. Chung, et A. K. David. "Inter-Area Mode Transient Stability Estimation." Electrical Power and Energy Systems, Vol. 17, N°5, 1995, pp. 305-312.

[DEB-92] Debs A., et F. Dominguez. "Development of Contingency Screening and Ranking Methods for On Line Dynamic Security Assessment." Southcon/92, 10 au 12 Mars 1992, pp. 336-340.

[DON-91] Dong Y., et H. R. Pota. "Fast Transient Stability Assessment using Large Step-Size Numerical Integration." IEE Proceedings C, Vol. 138, N°4, Juillet 1991, pp 377-383.

[DON-94] Dong Y., et H. R. Pota. "First Swing Stability by Solving Simultaneous Differential and Algebraic Equations without Systems Reduction." Electrical Power and Energy Systems, Vol. 16, n°2, 1994, pp. 105-110.

[EDW-96] Edwards A. R., K. W. Chan, R. W. Dunn et A. R. Daniels. "Transient stability screening using artificial neural networks within a dynamic security assessment system." IEE Proc. -Gener. Transm. Distrib., Vol. 143, N°2, mars 1996, pp. 129-134.

[EJE-96] Ejebe G. C., G. D. Irisarri, W. F. Tinney, V. Vittal, et G. Cauley. "A Sparse Formulation and Implementation of the Transient Energy Function Method for Dynamic Security Analysis." Electrical Power and Energy Systems, Vol. 18, N°1, 1996, pp. 3-9.

[EL-A-97] El-Amin I. M. et A.-A. M. Al-Shams. "Transient stability assessment using artificial neural networks." Electric Power Systems Research, Vol. 40, 1997, pp. 7-16.

[EUX-92] Euxibie E., M. Goubin, B. Heilbronn, L. Wehenkel, Y. Xue, T. Van Cutsem, et M. Pavella. "Perspectives d'application au réseau français de méthodes rapides d'évaluation de la

stabilité transitoire et de la sécurité en tension." Cigré 92, 30 Août au 5 Septembre 1992, 38-208, pp. 1-9.

[FAN-97] Fang D. Z., T. S. Chung et A. K. David. "Improved techniques for hybrid method in fast-transient stability assessment." IEE Proc. -Gener. Transm. Distrib., Vol. 144, N°2, mars 1997, pp. 107-112.

[FOU-81] Fouad A. A., et S. E. Stanton. "Transient Stability of a Multimachine Power System. Part I : Investigation of the System Trajectory. Part II : Critical Transient Energy." IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, N°7, Juillet 1981, pp. 3408-3424.

[FOU-82] Fouad A. A., S. E. Stanton, K. R. C. Mamandur, et K. C. Kruempel. "Contingency Analysis using the Transient Energy Margin Technique." IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, N°4, Avril 1982, pp.757-766.

[FOU-92] Fouad A. A., et V. Vittal. "Power system Transient Stability Analysis Using the Transient Energy Function Method." Prentice Hall, 1992.

[FU-98] Fu C. et A. Bose. "Contingency ranking based on severity indices in dynamic security analysis." Paper submitted in the IEEE summer meeting, 1998, PE-245-PWRS-0-03-1998.

[HAQ-89] Haque M. H., et A. H. M. A. Rahim. "Determination of First Swing Stability Limit of Multimachine Power Systems through Taylor Series Expansions." IEE Proceedings, Vol. 136, Pt. C, N°6, Novembre 1989, pp 373-379.

[HAQ-95] Haque M. H. "Further developments of the equal-area criterion for multimachine power systems." Electric Power Systems Research, Vol. 33, 1995, pp 175-183.

[HAQ-96] Haque M. H. "Hybrid method of determining the transient stability margin of a power system." IEE Proc. -Gener. Transm. Distrib., Vol. 143, N°1, Janvier 1996, pp. 27-32.

[HIR-92] Hiroyuki K., K.-I. Nishiya, J. Hasegawa et T. Mizuno. "Dynamic preventive control for power system using transient stability assessment based on pattern recognition." Electrical Engineering in Japan, Vol. 112, N°8, 1992, pp. 44-53.

[HIS-89] Hiskens I. A., et D. J. Hill. "Energy Functions, Transient Stability and Voltage Behavior in Power Systems With Nonlinear Loads." IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 4, N°4, Octobre 1989, pp. 1525-1533.

[HOB-94] Hobson E. et G. N. Allen. "Effectiveness of artificial neural networks for first swing stability determination of practical systems." IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 9, N°2, Mai 1994, pp. 1062-1068.

[IRI-94] Irisarri G. D., G. C. Ejebe, J. G. Waight et W. F. Tinney. "Efficient solution for equilibrium points in transient energy function analysis." IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 9, N°2, Mai 1994, pp. 693-699.

- [KAK-78] Kakimoto N., Y. Ohsawa, et M. Hayashi. "Transient Stability Analysis of Electrical Power System Via Lure Type Lyapunov Function. Parts I and II." IEE Transactions of Japan 98, 1978, pp. 63-79.
- [LEM-89] Lemmon W. W., K. R. C. Mamandur et W. R. Barcelo. "Transient stability prediction and control in real-time by QUEP." IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 4, N°2, Mai 1989, pp. 627-642.
- [LLA-92] Llamas A. "Assessment of Direct Methods in Power System Transient Stability Analysis for On-Line Applications." Ph. D. Dissertation, Virginia Tech, 1992.
- [LLA-95] Llamas A., J. De La Ree Lopez, L. Mili, A. G. Phadke, et J. S. Thorp. "Clarifications of the BCU Method for Transient Stability Analysis." IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 10, N°1, Février 1995, pp. 210-219.
- [LUS-93] Lusaka P. J., J. A. Momoh et P. Bofah "An ANN-based fast contingency screening tool for dynamic security assessment." Proceedings of PSCC, 30 Août-3 septembre 1993, pp. 151-160.
- [MAG-96] Maginier S. "Perspectives d'application des réseaux de neurones au filtrage des défauts dans l'analyse de la stabilité transitoire" Rapport interne, décembre 1996.
- [MAN-95] Mansour Y., E. Vaahedi, A. Y. Chang, B. R. Corns, B. W. Garrett, K. Demaree, T. Athay, et K. Cheung. "B.C. Hydro's On-Line Transient Stability Assessment (TSA). Model Development, Analysis, and Post-Processing." IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 10, N°1, Février 1995, pp. 241-253.
- [MAR-90] Maria G. A., C. Tang, et J. Kim. "Hybrid Transient Stability Analysis." IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 5, N°2, Mai 1990, pp. 384-393.
- [PAD-89] Padiyar K. R., et K. K. Ghosh. "Dynamic Security Assessment of Power Systems Using Structure-Preserving Energy Functions." Electrical Power and Energy Systems, Vol. 11, N°1, Janvier 1989, pp. 39-46.
- [PAI-89] Pai M. A. "Energy Function Analysis For Power System Stability." Kluwer Academic Publishers, 1989.
- [PAI-91] Pai M. A., P. W. Sauer et F. Dobraca. "A new trajectory approximation technique for transient stability studies." Electrical Power and Energy Systems, 1991, Vol. 13, n°5, pp. 249-254.
- [PAI-96] Pai M. A., M. Laufenberg, et P. W. Sauer. "Some Clarifications in the Transient Energy Function Method." Electrical Power and Energy Systems, 1996, Vol. 18, n°1, pp. 65-72.
- [PAO-92] Pao Y.-H. et D. J. Sobajic. "Combined use of unsupervised and supervised learning for dynamic security assessment." IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 7, N°2, Mai 1992, pp. 878-884.

- [PAV-94] Pavella M., et P. G. Murthy. "Transient Stability of Power Systems : Theory and Practice." John Wiley & Sons, 1994.
- [RAH-91] Rahimi F. A., N. J. Balu et M. G. Lauby. "Assessing online transient stability in energy management systems." IEEE Computer Applications in Power, Juillet 1991, pp. 44-49.
- [RAH-93] Rahimi F. A., M. G. Lauby, J. N. Wrubel, et K. L. Lee. "Evaluation of the Transient Energy Function Method for On-Line Dynamic Security Analysis." IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 8, N°2, Mai 1993, pp. 498-507.
- [RIB-76] Ribbens-Pavella M., et B. Lemal. "Fast Determination of Stability Regions for On-Line Power Systems Studies." IEE Proceedings, Vol. 123, 1976, pp. 689-696.
- [SAI-76] Saito O, K. Koizumi, M. Udo et M. Sato. "Fast transient stability calculation by pattern recognition method." Electrical Engineering in Japan, Vol. 96, N°5, 1976, pp. 88-95.
- [SOB-89] Sobajic D. J. et Y.-H. Pao "Artificial neural-net based dynamic security assessment for electric power systems." IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 4, N°1, Février 1989, pp. 220-227.
- [TAN-94] Tang C. K., C. E. Graham, M. El-Kady, et R. T. H. Alden. "Transient Stability Index from Conventional Time Domain Simulation." IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 9, N°3, Août 1994, pp. 1524-1530.
- [TRE-96] Treinen R. T., V. Vittal, et W. Kliemann. "An improved technique to determine the controlling unstable equilibrium point in a power system." IEEE Transactions on Circuits and Systems_I : Fundamental Theory and Applications, Vol. 43, N°4, Avril 1996, pp. 313-323.
- [TSO-85] Tsolas N. A., et A. Arapostathis. "A Structure Preserving Energy Function for Power System Transient Stability Analysis." IEEE Transactions on Circuits and Systems, Vol. CAS. 32, N°10, Octobre 1985, pp. 1041-1049.
- [UYE-72] Uyemura K., J. Matsuki, I. Yamada, et T. Tsuji. "Approximation of an Energy Function in Transient Stability Analysis of Power Systems." Electrical Engineering in Japan 92, n°4, 1972, pp. 96-100.
- [VAA-96] Vaahedi E., Y. Mansour, A. Y. Chang, B. R. Corns, et E. K. Tse. "Enhanced "Second Kick" Methods for On-Line Dynamic Security Assessment." Article présenté au 1996 IEEE/PES Winter Meeting. 96 WM 264-2 PWRs. 21-25 janvier 1996.
- [VIT-89] Vittal V., N. Bhatia, A. A. Fouad, G. A. Maria, et H. M. Zein El-Din. "Incorporation of Nonlinear Load Models in the Transient Energy Function Method." IEEE Transactions on Power Systems 4, n°3, Août 1989, pp. 1031-1036.
- [XUE-88] Xue Y., Th. Van Cutsem, et M. Ribbens-Pavella. "A Simple Direct Method for Fast Transient Stability Assessment of Large Power Systems." IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 3, N°2, Mai 1988, pp. 400-412.

[XUE-89] Xue Y., Th. Van Cutsem, et M. Ribbens-Pavella. "Extended Equal Area Criterion : Justifications, Generalizations, Applications." IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 4, N°1, Février 1989, pp. 44-52.

[XUE-92] Xue Y., L. Wehenkel, R. Belhomme, P. Rousseaux, M. Pavella, E. Euxibie, B. Heilbronn, et J. F. Lesigne. "Extended Equal Area Criterion Revisited." IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 7, N°3, Août 1992, pp. 1012-1022.

[XUE-93a] Xue Y., R. Belhomme, P. Rousseaux, L. Wehenkel, M. Pavella, E. Euxibie, et B. Heilbronn. "Dynamic Extended Equal-Area Criterion. Part I : Basic Formulation. Part II : Recent Extensions." Proceedings of the Athens Power Tech, NTUA-IEEE/PES Joint International Power Conference, Septembre 1993, pp. 889-900.

[XUE-93b] Xue Y., et M. Pavella. "Critical-Cluster Identification in Transient Stability Studies." IEE Proceedings-C, Vol. 140, N°6, Novembre 1993, pp. 481-489.

[YAM-84] Yamashiro S. et T. Koike. "Methods for on-line transient stability assessment of power system." Electrical Engineering in Japan, Vol. 104, N°5, 1984, pp. 75-82.

L'analyse de la sécurité dynamique en temps réel est très difficile à réaliser en raison du nombre important de calculs à réaliser en quelques minutes seulement. Jusqu'à aujourd'hui, aucune méthode ne s'est révélée suffisamment efficace pour remplir cette tâche. Dans ce contexte, le filtrage des contingences représente un enjeu majeur puisqu'il permet d'économiser beaucoup de temps de calculs.

Le but de nos travaux de recherche a été de mettre au point une stratégie de filtrage basée sur les méthodes d'analyse de la stabilité transitoire existantes. Dans un premier temps, les principales méthodes d'analyse de la stabilité transitoire ont été étudiées et testées à l'aide de quatre réseaux électriques de tailles différentes.

Les méthodes qui sont apparues comme les plus efficaces ont ensuite été développées et modifiées, afin d'améliorer leur rapidité, leur fiabilité et leur précision. Deux nouvelles méthodes ont ainsi été créées. La première méthode permet de déterminer très rapidement et de manière très fiable la stabilité du réseau. La deuxième permet de calculer précisément le TEC avec un minimum de simulations.

A partir de ces deux méthodes qui ont des caractéristiques complémentaires, une stratégie de filtrage multi-niveau, réalisant un bon compromis entre la rapidité, la fiabilité et la précision, a été proposée.

Mots Clés : analyse de la sécurité dynamique en temps réel, stabilité transitoire, fonction d'énergie transitoire, filtrage de contingences multi-niveau, méthodes directes, méthode PEBS, méthode hybride, méthode PEBS individuelle, méthode itérative hybride, méthode EEAC.

On-line dynamic security analysis is very difficult to realize because of the numerous calculations necessary in just a few minutes. Until now, no methods have been able to accomplish this task. In this context, contingency screening is very important because it allows reducing significantly the number of calculations.

The scope of this study has been to realize contingency screening with existing transient stability analysis methods. First, the main transient stability analysis methods have been studied and tested with four power systems. Subsequently, the most efficient methods have been modified and improved to increase their speed, reliability and accuracy.

Following these modifications, two new dynamic security analysis methods have been designed. The first method allows a quick and accurate determination of the power system stability. The second method allows the precise CCT calculation within a few simulations.

From these two methods which have complementary characteristics, a multi-level contingency screening method has been proposed. This screening method is reliable, accurate and fast.

Keywords : on-line dynamic security assessment, transient stability, transient energy function, multi-level contingency screening, direct methods, PEBS method, hybrid method, individual PEBS method, iterative hybrid method, EEAC method.