

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE HOUARI BOUMEDIENE
FACULTÉ D'ELECTRONIQUE ET D'INFORMATIQUE



Mémoire présenté pour l'obtention du Diplôme de MAGISTER

En : **ELECTRONIQUE**

Spécialité : **Systèmes Electro-Energétiques**

Par : **Ouali Abdelhamid Ahmed**

Thème

ÉVALUATION DE LA STABILITÉ TRANSITOIRE DES RÉSEAUX ÉLECTRIQUES PAR LES RÉSEAUX DE NEURONES ARTIFICIELS ET LES PLANS D'EXPÉRIENCES

Soutenu le 30 Octobre 2008, devant le jury composé de :

Mr : Y. OUAZIR, Maitre de conférences (USTHB)	Président
Mr : M. BOUDOUR, Maitre de conférences (USTHB)	Directeur de thèse
Mr : A. HELLAL, Professeur (UAT Laghouat)	Examineur
Mr : M. MENAA, Maitre de conférences (USTHB)	Examineur
Mr : B. BOUSSAHOUA, Chargé de cours (USTHB)	Invité

Remerciements

Mes remerciements vivement M M.BOUDDOUR et M B. BOUSSAHOUA pour leurs disponibilités tout au long de ce travail, je les remercie encore pour leur aide si précieuse sur plan conseils et orientations.

Je tiens tout particulièrement à remercier les enseignants du département électrotechnique pour leur disponibilité et encouragement, ainsi que tous les enseignants qui ont contribué à ma formation.

Mes reconnaissances vont aussi à messieurs les membres de jury, pour l'honneur qu'ils auront fait en acceptant de juger ce travail.

Sommaire

Nomenclatures et abréviations

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale..... 1

Chapitre I Stabilité transitoire des réseaux d'energie électrique

I.1 Introduction.....	4
I.2 Stabilité des réseaux d'énergie électrique	4
I.2.a Position du problème.....	4
I.2.b Notion de la stabilité	4
I.2.c Types de stabilité.....	5
1. La stabilité statique.....	5
2. La stabilité dynamique	5
3. La stabilité transitoire.....	6
I.3 Méthodes d'analyse de la stabilité transitoire	6
I.4 Méthodes d'évaluation de la stabilité transitoire	8
I.4.a Méthodes d'intégration numérique	8
I.4.b Méthodes énergétique directes	10
I.4.b.1 Méthodes graphiques (Critère d'égalité des aires).....	10
I.4.b.2 Méthodes Directes de Lyapunov	12
I.4.c Méthodes des réseaux de neurones artificiels	13
I.4.d Méthodes hybrides	16
I.5 Techniques d'optimisation	17
I.5.a Algorithmes Evolutionnaires	17
I.5.b Méthode des Plans d'Expérience	19
I.6 Objectifs et Contributions	20

Chapitre II Evaluation de la stabilité transitoire des réseaux d'énergie électrique par intégration numérique

II.1 Introduction	22
II.2 Equations d'équilibre du système	22
II .3 Modélisation des lignes de transmission	24
II .4 Modélisation des charges	24
II.5 Equation mécanique du rotor.....	25

II.6 Equation électrique de l'alternateur	30
II.6.a Transformation de Park	30
II.6.b Détermination des paramètres de la machine	34
II.6.c Expression de la tension terminale	35
II.6.d Expression dynamiques de la machine	37
1. Variation de la $f.e.m$ transitoire d'axe transversal	37
2. Variation de la $f.e.m$ transitoire d'axe direct	37
3. Expression de la puissance électrique	38
II.7 Organes de régulation de la machine.....	38
II.7.a Structure de régulateur de tension	38
II.7.b Structure de régulateur de vitesse	39
II.8 Equations de performances.....	40
II.9 Modélisation du réseau dans l'espace d'état	43
II.10 Evaluation de la stabilité transitoire	46
II.11 Résultats et interprétations.....	49
II.11.a Résultats de l'écoulement de charge.....	49
II.11.b Résultats de la stabilité transitoire	50
II.11.b.1. Matrices admittances du réseau	50
II.11.b.2 Caractéristiques des angles rotoriques.....	54
II.11.b.3 Caractéristiques des tensions	54
II.12 Conclusion	55

Chapitre III Evaluation de la stabilité transitoire des REE par RNA

III.1 Introduction	56
III.2 Réseau de neurones artificiel.....	56
III.2.a Fondement Biologique	56
III.2.b Le Neurone Formel (Artificiel)	57
III.2.c Réseau de neurones	59
II.2.c.1 Architecture du réseau de neurones	59
II.2.c.2 Les connexions du réseau de neurones	59
III.2.d Réseau de neurones multicouche	60
III.2.e Apprentissage des réseaux de neurones	61
III.2.f Algorithme d'apprentissage.....	61
III.3 Rétropropagation du gradient.....	62
III.4 Application des R.N.A à l'étude de la stabilité transitoire des R.E.E.....	66
III.4.1 Création de l'ensemble d'apprentissage	67
III.4.2 Architecture du RNA utilisé.....	67

III.4.3 Phase de Test.....	69
III.5 Conclusion.....	69

Chapitre IV Optimisation des réseaux de neurones artificiels par les plans d'expériences

IV.1. Introduction.....	71
IV.2 Méthodes classiques et ses inconvénients	71
IV.3 Notions d'espace expérimental	72
IV.3.a Plans d'expériences	72
IV.3.b Facteur.....	73
IV.3.c Domaine d'étude, surface de réponse	74
IV.3.d Coordonnées centrées réduites (Notation de YATE).....	76
IV.3.e Plan d'Expériences	77
IV.4 Plans factoriels à deux niveaux.....	77
IV.4.a Matrice d'Expériences M.E	78
IV.4.b Traitement du plan d'expériences pour k=3	80
IV.4.c Modèle Mathématique.....	81
IV.4.d Avantages et inconvénients des plans factoriels complets à deux niveaux	83
IV.5 Construction du Plan Factoriel Complet (PFC).	84
IV.6 Plans Factoriels Fractionnaires (PFF)	86
IV.6.a Contrastes et Aliases	86
IV.6.b Générateurs d'aliases	88
IV.6.c Résolution d'un plan fractionnaire	89
IV.6.d Plans fractionnaires admissibles	90
IV.6.e Plans fractionnaires 2^{9-5}	91
IV.7 Analyse de la variance	93
IV.7.a Notion de degrés de liberté	94
IV.7.b Calcul de la variance	95
IV.7.c Test de Fisher-Snedecor	95
IV.8 Exploitation des résultats obtenus	96
IV.8 a Application du nouveau RNA	96
IV.8.b Test et interprétations	97
IV.9 Conclusion	98
Conclusion générale	99
Bibliographie	
Annexe : Données du réseau IEEE 3 machines 9 nœuds	

Nomenclature & Abréviations

D	Coefficient d'amortissement
e'_d, e'_q	<i>f.e.m.</i> transitoire d'axe direct et d'axe en quadrature
e_{ex}	Tension d'excitation
e_{ex0}	Valeur initiale de la tension d'excitation
e_q	<i>f.e.m.</i> en régime permanent
E_{xma}, E_{xmi}	Seuils maximal et minimal d'excitation
$f(.)$	Fonction d'activation
H	Constante d'inertie du groupe turboalternateur
i_d, i_q	Composantes directe et en quadrature du courant
K_v	Gain statique du régulateur de vitesse
K_e	Gain statique du régulateur de tension
M	Moment d'inertie du groupe turboalternateur
net_j	Entrée des neurones dans la couche j
o_i	Sortie des neurones dans la couche i
P	Nombre de facteur
P_m	Puissance mécanique développée par la turbine
P_e	Puissance électrique développée par le générateur
P_{mma}, P_{mmi}	Seuils maximal et minimal de la puissance mécanique
$P_{mréf}$	Puissance mécanique de référence
T'_{d0}	Constantes de temps transitoires d'axe direct
t_e	Temps d'élimination du défaut
T_e	Constante de temps du régulateur de tension
T'_{q0}	Constantes de temps transitoires d'axe en quadrature
T_v	Constante de temps du régulateur de vitesse
v_d, v_q	Composantes direct et en quadrature de la tension
v	Module de la tension aux bornes du générateur
V_{ref}	Valeur de consigne
x_d, x_q	Réactances synchrones d'axe directe et en quadrature

x_d', x_q'	Réactances transitoires d'axe directe et en quadrature
Z_{io}	impédances placées entre les nœuds consommateurs et la terre
ω	Vitesse rotorique
ω_0	Vitesse rotorique de référence
w_i	Poids du RNA
δ, δ_e	Angle rotorique et angle électrique
δ_{in}	Angle rotorique par rapport à la référence machine
δ_m	Angle rotorique mécanique
σ	Dosage accélérométrique
γ	Taux de statisme
τ	Promptitude
b_{inf}	Niveau bas d'un facteur
b_{sup}	Niveau haut d'un facteur
VA	Variance du facteur A
Vr	Variance résiduelle
AGC	Automatic Generation Control
CCT	Critical Clearing Time (temps critique d'élimination du défaut)
DE	Domaine d'étude
EA	Evolutionary Algorithms
EAC	Equal Area Criterion (critère d'égalité des aires)
ED	Economic Dispatch
Epoch	Nombre d'itération
FACTS	Flexible AC Transmission System
IN	Intégration Numérique
MOD	Mode Of Disturbance (mode de perturbation)
MPE	Méthode des Plans d'Expériences
OMIB	One Machine Inifit Bus
PID	Régulateur Proportionnel Intégral Dérivé
PEBS	Potential Energy Boundary Surface (surface limite de l'énergie potentielle)

PMC	Perceptrons Multicouches
PSS	Power System Stabilizer
<i>pu</i>	per unit
RNA	Réseau de Neurones Artificiels
SIME	SIngle Machine Equivalent
UEPs	Unstable Equilibriums Points (points d'équilibre instables)
UPFC	Unified Power Flow Controler

Liste des figures

I.1	Représentation graphique du critère d'égalité des aires	11
I.2	Principe d'un algorithme évolutionnaire standard	18
I.3	Principales étapes de la Méthode des Plans d'Expériences.....	20
II.1	Schéma équivalent en Π d'une ligne moyenne de transport	24
II.2	Représentation de la machine synchrone	31
II.3	Représentation bipolaire de la machine synchrone	32
II.4	Représentation magnétique de la machine synchrone	34
II.5	Représentation vectorielle de la machine synchrone	36
II.6	Schéma électrique monophasé équivalent de la machine synchrone	37
II.7	Structure du régulateur de tension	38
II.8	Structure du régulateur de vitesse	40
II.9	Algorithme d'évaluation de la stabilité transitoire	48
II.10-a	Angle rotorique en degré	54
II.10-b	Tensions aux nœuds machines (pu)	55
II.11-a	Angle rotorique en degré	54
II.11-b	Tensions aux nœuds machines (pu)	55
III.1	Neurone biologique	57
III.2	Modèle d'un neurone formel	58
III.3-a	Connexions directes	59
III.3-b	Connexions récurrentes	59
III.4-a	Connexions partielles	60
III.4-b	Connexions totales	60
III.5	Réseau de neurones multicouche	60
III.6	Flux des signaux de la rétropropagation	63
III.7	Algorithme de la rétropropagation de l'erreur	66
III.8	Evolution du processus d'entraînement du RNA	68
IV.1	Variable x_i prend différents niveaux, les autres variables étant fixes	71
IV.2	Domaine de variation du facteur	73
IV.3	Espace expérimental	74
IV.4	Point expérimental.....	74
IV.5	Domaine d'étude	75

IV.6	Surface de réponse.....	75
IV.7	Notation de YATE	76
IV.8	Sommets A, B, C et D du domaine d'étude.....	77
IV.9	Domaine d'étude d'un plan 2^2	78
IV.10	Domaine expérimental d'un plan 2^3	79
IV.11	Classement par ordre d'influence des facteurs	93
IV.12	Evolution du processus d'entrainement du nouveau RNA	97

Liste des tableaux

II.1	Matrice admittance Y du réseau IEEE 3 machines 9 nœuds (pu)	49
II.2	Résultats d'écoulement de charge	50
II.3	Matrice admittance avant défaut (pu)	51
II.4	Matrice admittance réduite avant défaut (pu)	51
II.5	Matrice admittance durant le défaut (pu)	52
II.6	Matrice admittance réduite durant le défaut (pu)	52
II.7	Matrice admittance après élimination du défaut (pu)	53
II.8	Matrice admittance réduite après élimination du défaut (pu)	53
III.1	Transition entre le neurone biologique et le neurone formel.....	58
III.2	Résultats du réseau de neurones.....	69
IV.1	Matrice d'expériences d'un plan 2^2	78
IV.2	Matrice d'expérience d'un plan 2^3	79
IV.3	Matrice d'expériences et vecteur des effets	80
IV.4	Matrice d'expériences du plan factoriel complet	85
IV.5	Plan factoriel fractionnaire 2^{3-1}	86
IV.6	Matrice de calcul des contrastes pour les deux demi plan fractionnaire (2^{3-1}).....	88
IV.7	Valeurs minimales de r (r_{max}).....	90
IV.8	Résolutions maximales des premiers plans fractionnaires réalisables.....	91
IV.9	Plan factoriel fractionnaire 2^{9-5}	92
IV.10	Règle de calcul du ddl	94
IV.11	Test de Fisher-Snedecor	96
IV.12	Résultats du test du réseau de neurones	97

Introduction Générale

L'industrialisation et la croissance de la population sont les facteurs primordiaux qui font que la consommation de l'énergie électrique ne cesse d'augmenter. Ainsi, pour satisfaire ces exigences et avoir un équilibre entre la production et la consommation, il est à première vue nécessaire d'augmenter le nombre des centrales électriques, des lignes de transport, des transformateurs,...etc., ce qui implique une augmentation considérable du coût.

La difficulté de trouver des couloirs pour de nouvelles lignes de transports, l'augmentation des interconnexions et la dérégulation du marché de l'électricité ont modifié profondément les conditions de maîtrise de fonctionnement des réseaux électriques. En effet, le libre accès au réseau et les contrats de fourniture conclus entre producteur et consommateur rendent les conditions d'exploitation de plus en plus imprévisibles. En plus, la recherche d'une efficacité économique maximale a conduit à des réseaux maillés exploités proche de leurs limites de stabilité.

Les problèmes liés au fonctionnement des réseaux de transport d'énergie électrique ont pris une grande importance, notamment après plusieurs black-out paralysant des pays entiers. De ce fait, un besoin urgent est ressenti pour inclure des programmes d'évaluation en temps réel de tels incidents dans les centres de conduite. Ces programmes doivent permettre aux conducteurs de mesurer le degré de stabilité du réseau de façon à pouvoir prendre les précautions nécessaires afin d'éviter un effondrement partiel ou total du système.

La tension et la fréquence sont les deux facteurs principaux déterminant la qualité de l'énergie électrique, ils doivent être maintenues dans les limites correspondant aux besoins des consommateurs et au bon fonctionnement du réseau. L'analyse de la stabilité consiste à évaluer la capacité du système à supporter des éventuelles perturbations, et de proposer par la suite les moyens de réglage adéquats et les mesures permettant d'améliorer cette capacité et le maintien dans des limites admissibles de ces deux grandeurs [1].

Les générateurs interconnectés produisent les couples qui dépendent du déplacement relatif aux angles des rotors. Ces couples agissent pour maintenir les générateurs au synchronisme. Suite à une perturbation plus ou moins grande, la nature non linéaire du couple de synchronisme peut ne pas conserver les angles des machines dans un état d'équilibre. Ainsi, un (ou plusieurs) générateur (s) peut (ou peuvent) perdre le synchronisme et le système devient instable.

Les conséquences de tels incidents sont importantes, tant du point de vue de l'économie (l'électricité est une des pierres angulaires du fonctionnement de l'économie), de la sociologie (les sociétés modernes sont très sensibles aux coupures d'énergie), que de la sécurité (services sensibles et clients particuliers comme les hôpitaux...). De ce fait, pour garantir une qualité de service à leurs clients et faire face aux incidents majeurs, les compagnies d'électricité ont tendance à adopter des règles de sécurité de sorte que le réseau électrique soit capable de faire face, à chaque instant, aux tels aléas sur les ouvrages électriques.

L'étude de la stabilité transitoire traite de la capacité d'un réseau électrique à atteindre un régime permanent acceptable suite à une grande contingence. Le réseau, dans ces conditions, peut être considéré comme étant dans un processus de changement de configuration en trois phases : avant, pendant et après élimination de la contingence.

Durant la phase avant défaut, le réseau est habituellement dans un régime permanent stable. Le défaut survient, le réseau fonctionne alors dans les conditions de défaut (dit transitoire) avant que celui-ci ne soit éliminé par les dispositifs de protection. L'analyse de la stabilité est l'étude qui consiste à savoir si les trajectoires des paramètres d'intérêt convergent vers un régime permanent acceptable après un certain temps d'élimination du défaut.

Dans ce présent travail, nous nous intéressons particulièrement à l'évaluation de la stabilité transitoire du réseau de transport d'énergie électrique par les réseaux de neurones artificiels, où l'on appliquera la méthode des plans d'expérience afin d'optimiser les paramètres d'entrée de ces derniers.

La rédaction de ce mémoire est structurée en quatre chapitres :

Le premier chapitre traite des concepts et notions de base indispensables à toute étude de stabilité de fonctionnement des réseaux d'énergie électrique. De ce fait, les grandes lignes de la stabilité des réseaux électriques sont définies, un état de l'art des méthodes utilisées pour l'évaluation de la stabilité transitoire est présenté et les techniques d'optimisation du vecteur d'entrée sont développées.

Au deuxième chapitre, une description du modèle du système électrique étudié est effectuée. L'ensemble du système étudié est constitué de l'alternateur, la ligne de transport, les charges, ainsi que les régulateurs primaires de tension et de vitesse. Puis un modèle sous forme d'état est présenté à partir des équations d'état régissant le système électrique.

L'évaluation de la stabilité transitoire par la méthode classique d'intégration numérique est discutée dans ce chapitre.

Le troisième chapitre est consacré à l'application des réseaux de neurones artificiels RNA dans l'évaluation de la stabilité. Un aperçu est donné sur le fondement théorique de cette technique ainsi que ses applications à l'étude de la stabilité transitoire des Réseaux d'Energie Electrique REE. L'objectif étant d'estimer les temps critiques d'élimination de défaut CCT. Les résultats de simulation sont présentés et discutés en fin du chapitre.

Le quatrième chapitre porte sur l'optimisation du vecteur d'entrée du réseau de neurones par la méthode des plans d'expériences MPE. Nous avons été séduits par cette méthode, car elle permet d'extraire le maximum d'informations avec un minimum de simulations. La philosophie de cette technique exposée n'a pas pour but d'expliquer la totalité de la méthode mais de présenter les fondements permettant son application pratique dans notre travail.

Enfin, cette étude est complétée par une conclusion générale synthétisant les principaux résultats obtenus et mettant en exergue les perspectives pour des travaux ultérieurs.

Chapitre 1

Stabilité Transitoire des Réseaux d'Énergie Électrique

I.1 Introduction

L'énergie électrique étant très difficilement stockable, il doit y avoir en permanence équilibre entre la production et la consommation. Pour un réseau d'énergie électrique en fonctionnement stable, la puissance mécanique de la turbine entraînant un générateur et la puissance électrique fournie par celui-ci sont équilibrées (en négligeant les pertes) pour toute machine.

Lorsque le réseau subit une perturbation (court circuit, perte de charge, perte d'un générateur, ouverture d'une ligne,...etc.), la différence entre les puissances mécanique et électrique induit une accélération ou une décélération pouvant entraîner la perte de synchronisme d'un ou de plusieurs générateurs. Les angles rotoriques oscillent jusqu'à l'intervention des systèmes de réglage et de protection afin de restituer la marche en synchronisme et mener le réseau à un état de fonctionnement stable.

Dans ce chapitre, les notions de stabilité des réseaux d'énergie électrique et ses différents types sont brièvement exposés ainsi que les différentes techniques appliquées pour l'évaluation de la stabilité transitoire. Les techniques d'optimisation des RNA sont également exposées dans ce chapitre.

I.2 Stabilité des réseaux d'énergie électrique

I.2.a Position du problème

La sûreté de fonctionnement ou sécurité d'un réseau ou système d'énergie électrique peut être définie comme la robustesse de son fonctionnement sous des conditions d'opérations normales aussi bien que perturbées. La sécurité couvre ainsi un large éventail de phénomènes que l'on subdivise, généralement en statique, dynamique et transitoire [1].

I.2.b Notion de la stabilité

La stabilité est définie comme la propriété d'un système à retrouver un point de fonctionnement stable (point d'équilibre) après avoir subi une ou plusieurs perturbations. Un réseau électrique a en général une stabilité globale qui se manifeste par l'équilibre production-consommation. Elle est caractérisée par les fluctuations de puissances transitées dans le réseau et se mesure par les variations dans le temps des tensions et de la fréquence [2, 3, 4].

I.2.c Types de stabilité

Le comportement d'un réseau face aux problèmes de stabilité dépend du lieu, de la nature et de l'ampleur de la perturbation. Cette dernière peut être de nature graduelle ou brusque (variations lentes de la charge, du plan de tension, court circuit sévère, perte d'ouvrages de production ou de transport ...etc.).

De ce fait, les études et l'expérience ont réparti la stabilité du système électrique en trois types: stabilité statique, dynamique et transitoire [2, 3, 5].

1. La stabilité statique

En général, à la fin d'un régime transitoire provoqué par une perturbation, le système atteint un régime dit permanent. Dans ce cas, l'étude de la stabilité du système, porte sur l'évaluation de l'état statique du réseau. Le système n'est pas en état de stabilité statique si les contraintes de fonctionnement ne sont pas respectées.

Dans cet état, les opérateurs du centre de contrôle ont suffisamment de temps pour ramener le système à l'état stable ou au régime normal en apportant des modifications supplémentaires. Si certaines contraintes d'exploitation ne sont pas respectées, une des parties du réseau se sépare du système, le reste continuant son fonctionnement normal.

Une autre définition peut être donnée à la stabilité statique qui consiste à dire qu'un réseau d'énergie électrique est dit stable en régime statique si suite à une perturbation quelconque infiniment petite, il retrouve un état de marche synchrone, identique ou infiniment voisin de l'état d'avant [5, 6].

2. La stabilité dynamique

Il arrive que de petites oscillations apparaissent sur les signaux, à cause d'un changement dans la structure du réseau, dans les conditions d'exploitation, dans les systèmes d'excitation ou au niveau des charges. Ces oscillations peuvent aboutir à déstabiliser un alternateur, une partie ou tout le réseau. Dans ce cas, nous pouvons utiliser des modèles linéaires afin de simuler le réseau. Les principaux éléments tels que les machines synchrones, les excitatrices, les systèmes de régulation de vitesse, la turbine et le PSS (Power System Stabilizer) dont les dynamiques ne sont pas négligeables seront pris en compte dans ces modèles [5, 6].

3. La stabilité transitoire

La stabilité transitoire d'un réseau électrique est son aptitude à assurer un fonctionnement synchrone de ses générateurs lorsqu'il est soumis à des perturbations importantes. L'apparition de pareilles perturbations peut conduire à de larges excursions des angles rotoriques de certains générateurs voir, si les actions correctives échouent, à la rupture de synchronisme qui, généralement, se développe en très peu de secondes sinon en des fractions de secondes [2, 3, 5, 6, 7].

Le phénomène de stabilité transitoire concerne les grandes perturbations. On peut citer les courts-circuits affectant un élément du réseau, la perte d'ouvrages important de production ou de transport,... etc. Les conséquences de ses défauts peuvent être très graves, pouvant même conduire à l'effondrement complet du réseau (black-out) [6, 7, 8].

La stabilité transitoire dépend :

- du type de perturbation.
- de la durée de perturbation.
- du lieu de perturbation.
- de la performance des systèmes de protection (relais, disjoncteurs...etc.).
- du point de fonctionnement avant défaut.
 - ◇ niveau de puissance active.
 - ◇ topologie du réseau.
 - ◇ degré d'excitation des machines.
- des caractéristiques dynamiques.
 - ◇ des générateurs.
 - ◇ des charges.
 - ◇ des régulateurs et des stabilisateurs mis en place.

I.3 Méthodes d'analyse de la stabilité transitoire

La dynamique de réseau durant la période transitoire est décrite par un système d'équations différentielles de la forme générale suivante [2, 5] :

$$\frac{dx}{dt} = f(x, u) \quad (\text{I.1})$$

avec x : Vecteur des variables d'état du système.

u : Vecteur des paramètres du système.

La stabilité transitoire concerne l'étude de la dynamique du réseau décrit par l'ensemble des équations différentielles (I.1). Cette étude fournit des informations relatives aux variations dans le temps des angles internes, vitesses rotoriques, tensions, courants et puissances des unités de production ainsi que les variations des tensions, courants et puissances transitées dans les branches de transport, avant, pendant et après la perturbation [6].

Cette analyse permet d'une part de juger si le système est en fonctionnement stable ou non et d'autre part de dimensionner les protections censées éliminer le défaut avant d'atteindre le temps critique (plan de défense ou de sauvegarde). Elle aide aussi les planificateurs dans leurs tâches de renforcement des réseaux d'énergie électrique par de nouveaux ouvrages de production, de transport ou des compensateurs.

Les études de la stabilité transitoire ne sont pas essentielles seulement dans les exercices de protection et de planification mais elles sont aussi présentes dans l'établissement des prévisions de charge journalière, des plans de marche et même dans la conduite économique en temps réel (Economic Dispatch ED, Automatic Generation Control AGC...) [9].

On distingue différentes méthodes pour l'analyse de l'état transitoire des systèmes de puissance. Trois méthodes d'analyses se détachent :

- analyse en planification qui tient compte :
 - ◇ du temps de réponse des protections.
 - ◇ du type de conducteurs.
 - ◇ du niveau de tension.
 - ◇ de la qualité des régulateurs de tension et de vitesse.
- analyse en mode préventif, mettant en œuvre :
 - ◇ les méthodes numériques ou indirectes.
 - ◇ les méthodes directes.
- analyse en mode curatif aboutissant :
 - ◇ à la modification de la caractéristique des lignes.
 - ◇ au contrôle de transit de puissance dans les lignes.

Pour améliorer la stabilité transitoire, trois objectifs peuvent être fixés :

- l'amélioration du temps critique d'élimination des défauts.
- l'amortissement des oscillations après la perturbation.
- l'amélioration de la capacité de transfert des lignes.

I.4 Méthodes d'évaluation de la stabilité transitoire

En raison du retard dans la construction de nouveaux ouvrages (centrales de production, postes de transformation, lignes de transport...etc.), de la dérégulation du marché d'électricité et de l'interconnexion des réseaux électriques, les conducteurs du réseau électrique se retrouvent obligés de faire fonctionner les réseaux électriques près, ou même des fois, à leurs limites de stabilité. Ce qui donne une importance capitale à l'évaluation de la stabilité des réseaux d'énergie électrique en temps réel.

Une variété d'approches permettant l'évaluation de la stabilité des réseaux d'énergie électrique a été proposée dans la littérature. Elles peuvent être classées en quatre catégories distinctes [5, 10, 11] :

- a. Méthodes indirectes d'intégration numérique.
- b. Méthodes directes énergétiques.
- c. Méthodes directes d'apprentissage automatique.
- d. Méthodes hybrides.

Dans ce qui suit, nous donnons un aperçu de chacune de ces méthodes.

I.4.a Méthodes d'intégration numérique

L'avènement des ordinateurs a permis l'essor des méthodes temporelles et leur utilisation intensive. Ces méthodes évaluent la robustesse du réseau vis-à-vis de grandes perturbations en déterminant son évolution temporelle par résolution pas-à-pas de l'ensemble des équations intégrales et différentielles non linéaires et celles algébriques qui gouvernent le phénomène.

Jusqu'à très récemment, l'analyse de la stabilité transitoire restait effectuée dans les compagnies d'énergie électrique presque exclusivement en temps différé (off-line) aux moyens des simulations numériques, où les conditions de fonctionnement les plus défavorables sont considérées dans ces études. En examinant le comportement de divers paramètres du réseau en priorité, les tensions, les angles, la fréquence, ainsi que les puissances actives et réactives, on peut établir les conditions de fonctionnement stables face à d'éventuelles perturbations [9, 11, 12].

Ces méthodes permettent d'inclure dans le modèle mathématique les caractéristiques dynamiques des générateurs, des charges, des systèmes de régulation, les moyens et les systèmes de contrôle avancés (PSS, UPFC...), elles permettent aussi de prendre en considération les actions des circuits de protection.

Le modèle mathématique décrivant la dynamique d'un système pendant et après une perturbation donnée est un ensemble d'équations différentielles de premier ordre. Les techniques numériques les plus utilisées pour résoudre ces systèmes sont les méthodes d'Euler, Euler modifiée, de Runge-Kutta implicite et explicite ou encore celle du prédicteur-correcteur.

Cette approche comporte trois étapes essentielles :

- 1 - Étude du système avant défaut (écoulement de puissance).
- 2 - Étude de l'évolution des paramètres du réseau durant le défaut.
- 3 - Étude de l'évolution des paramètres après élimination du défaut.

Cette méthode est directement applicable à tous les niveaux de détail des modèles de réseau d'énergie électrique. Toutes les informations sur les variables d'état pendant le régime transitoire aussi bien que le régime permanent sont disponibles. D'autre part, les résultats de simulations peuvent directement être interprétés par les utilisateurs et les mécanismes d'instabilité peuvent être examinés en détail.

Les méthodes classiques d'intégration numérique sont très lourdes en calcul pour entrevoir leur application en temps réel. De plus elles ne donnent qu'une simple réponse stable ou instable sans permettre d'estimer la marge de stabilité du système. Aussi, on ne peut pas prévoir toutes les situations qui peuvent survenir lors du fonctionnement en temps réel du système, un besoin pressant est ressenti dans les centres de conduites des réseaux pour fournir des moyens d'évaluation en temps réel de la stabilité transitoire. Ceci explique les énormes efforts consentis aux méthodes directes pour satisfaire ces demandes [6, 10, 11].

Néanmoins, l'approche temporelle est la référence de toute analyse de stabilité transitoire. Comme nous le verrons par la suite, elle est également l'outil de base des méthodes non conventionnelles.

I.4.b Méthodes énergétique directes

I.4.d.1. Méthodes graphiques (Critère d'égalité des aires)

Cette méthode (EAC : Equal Area Criterion), a été appliquée à l'origine pour un système mono-machine, et par la suite aux systèmes multi-machines en les remplaçant par une machine équivalente reliée à un nœud infini. Cette méthode graphique permet de conclure sur la stabilité du système sans tracer et analyser les réponses temporelles.

Considérons une machine raccordée à un réseau de puissance infinie (impédance nulle, inertie infinie, tension et fréquence constantes). L'équation mécanique de la machine, en prenant le nœud infini comme référence, est donnée par :

$$\frac{H}{\omega_0} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \quad (\text{I. 2})$$

$$P_e = E_1^2 Y_{11} \cos \theta_{11} + E_1 V_\infty Y_{12} (\delta - \theta_{12}) \quad (\text{I. 3})$$

avec : P_a : puissance d'accélération

P_e : puissance électrique.

P_m : puissance mécanique supposée constante.

E_1 : tension derrière la réactance transitoire de la machine.

V_∞ : tension au nœud infini.

δ : angle interne de la machine

H : constante d'inertie

ω_0 : pulsation de référence.

Y_{11}, Y_{12} : admittances entre le nœud interne de la machine et le nœud infini.

Par simples transformations mathématiques, l'équation (I.2) peut s'écrire sous la forme :

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_0 = \sqrt{\frac{\omega_0}{H} \int_{\delta_0}^{\delta} P_a d\delta} \quad (\text{I. 4})$$

$\omega - \omega_0$: est la vitesse relative du rotor de la machine par rapport à un système de référence tournant avec une vitesse ω_0 (dans ce cas, le nœud de référence).

Si le système est stable, la machine doit tourner à la vitesse de référence ω_0 , où la condition pour que le système soit stable est :

$$P_a(\delta) \leq 0 \quad \text{et} \quad \int_{\delta_0}^{\delta} P_a d\delta = \int_{\delta_0}^{\delta} (P_m - P_e) d\delta = 0 \quad (\text{I. 5})$$

Cette condition peut être interprétée par le fait que l'excursion de l'angle rotorique doit atteindre un maximum et ensuite s'amortir.

L'intégrale (I.5) peut être représentée graphiquement (Figure I.1) avec les surfaces d'accélération A_{acc} et celle de décélération A_{dec} . La stabilité transitoire du système est assurée si : $A_{acc} < A_{dec}$. La limite de stabilité est atteinte quand les deux surfaces sont égales.

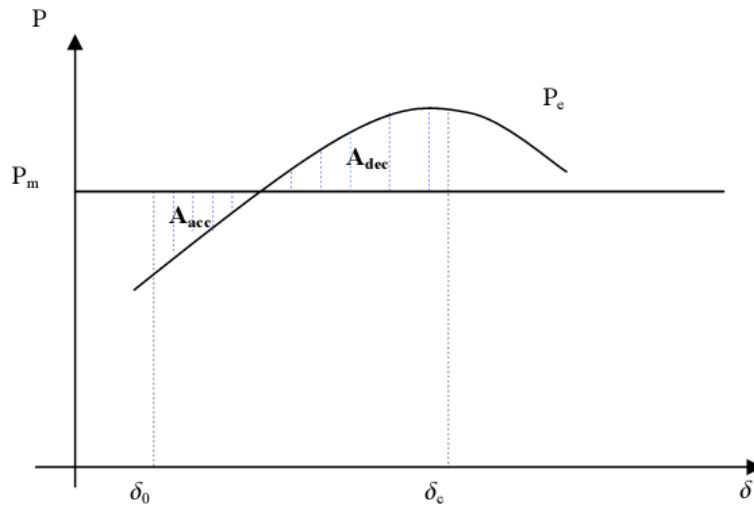


Figure I.1 : Représentation graphique du critère d'égalité des aires

L'angle critique du défaut δ_c peut être déterminé en utilisant les courbes d'oscillation $P(\delta)$ avant, pendant et après le défaut. Il est obtenu par la résolution d'une équation trigonométrique simple. Dans la référence [3], on trouve la description d'une méthode analytique qui permet de réduire un système de deux machines à un système mono machine équivalent.

I.4.b.2. Méthodes directes de Lyapunov

Durant les deux dernières décennies, les méthodes énergétiques directes ont suscité l'intérêt de plusieurs chercheurs. A.M. Lyapunov a développé une structure générale pour l'évaluation de la stabilité d'un système régi par un ensemble d'équations différentielles afin d'obtenir une évaluation plus rapide.

L'idée de base des nouvelles méthodes développées est de pouvoir conclure sur la stabilité ou l'instabilité du réseau d'énergie sans résoudre le système d'équations différentielles régissant le système après l'élimination du défaut. Elles utilisent un raisonnement physique simple basé sur l'évaluation des énergies cinétique et potentiel du système [8, 13, 14].

La dynamique du réseau d'énergie électrique est décrite par un système d'équations différentielles non linéaires de la forme suivante :

$$\frac{dx}{dt} = f(x, u) \quad (\text{I.6})$$

avec x : Vecteur des variables d'état du système.

u : Vecteur des paramètres du système.

Soit un point x_s , on dit que x_s est un point d'équilibre du système si $f(x_s, u) = 0$. Le théorème de stabilité de Lyapunov stipule que le point d'équilibre (origine) x_s est stable si dans un certain voisinage Ω de l'origine x_s , il existe une fonction réelle scalaire (fonction de Lyapunov) $V(x)$ telle que :

1. $V(x)$ est positive définie dans Ω
2. $\frac{dV}{dx}$ est négative semi-définie dans Ω

Si $\frac{dV}{dx} < 0$, alors la fonction $V(x)$ diminue avec le temps et tend vers sa valeur minimale (le point d'équilibre du système x_s). Plus la valeur est négative, plus rapide est le retour du système vers x_s (amortissement des oscillations plus rapide).

Contrairement à l'approche temporelle, les méthodes directes cherchent à déterminer directement la stabilité du réseau à partir des fonctions d'énergie. Ces méthodes déterminent en principe si oui ou non le système restera stable une fois le défaut éliminé en comparant l'énergie du système (lorsque le défaut est éliminé) à une valeur critique d'énergie pré déterminée.

Les méthodes directes énergétiques non seulement permettent de gagner un temps requis au calcul pas à pas que nécessite l'analyse temporelle, mais donnent également une mesure quantitative du degré de stabilité du système. Cette information additionnelle rend les méthodes directes très intéressantes surtout lorsque la stabilité relative de différentes installations doit être comparée ou lorsque les limites de stabilité doivent être évaluées rapidement.

Un avantage clé de ces méthodes est leur habilité dans l'évaluation du degré de stabilité (ou d'instabilité). Le second avantage est leur capacité à calculer la sensibilité de la marge de stabilité à divers paramètres du réseau, permettant ainsi un calcul efficient des limites d'exploitation.

Toutefois, une limitation majeure des méthodes directes énergétiques réside dans la simplicité des modèles utilisés (elles nécessitent d'autres efforts de développement mathématique pour qu'elles puissent prendre en considération les régulations de vitesse, de tension, les dispositifs d'amélioration de la stabilité transitoire PSS, FACTS, ...etc.). Une autre limitation est que les méthodes directes ne s'appliquent qu'à la stabilité de la première oscillation et ne donnent de réponse temporelle d'aucune des variables d'état de la période après contingence.

I.4.c Méthodes des réseaux de neurones artificiels

On appelle réseau de neurones artificiels l'ensemble de calculateurs numériques qui agissent comme des unités élémentaires. Ils sont reliés entre eux par un ensemble d'interconnexions pondérées qui transmettent des informations numériques d'un neurone formel à l'autre. Ils comprennent une variété d'architectures d'éléments de processus fortement interconnectés qui offrent une alternative aux approches conventionnelles de calcul.

Le principe de base de ces méthodes, est d'extraire l'information désirée des données d'entrée en la traitant à travers plusieurs couches constituées de neurones. Dans chaque couche, une représentation interne de l'entrée est générée puis utilisée comme sortie vers la couche suivante. L'apprentissage du réseau de neurones consiste à modifier répétitivement les valeurs de pondération des interconnexions jusqu'à ce que la performance du réseau atteigne le niveau désiré.

Les réseaux de neurones artificiels comprennent une variété d'architectures d'éléments de processus fortement interconnectés qui offrent une alternative aux approches conventionnelles de calcul [15] :

- Le Perceptron est le premier en date des réseaux de neurones, ce système comporte trois couches dont deux effectuent des traitements et une, la rétine, assure la réception des signaux.
- L'Adaline est un autre type de réseau spécialisé dans le traitement du signal fonctionnant à partir d'une règle d'apprentissage. Cette règle permet de réduire l'erreur observée entre l'état du réseau et la valeur correcte attendue par une modification des

connexions des neurones de façon à la minimiser par un algorithme dit de descente de gradient.

- L'associateur linéaire est un modèle de réseau à deux couches avec une fonction d'activation linéaire utilisant la règle de Hebb, qui a proposé l'idée que le cerveau s'adapte à son environnement en modifiant l'efficacité des connexions entre ses neurones. Le principe de Hebb postule qu'une synapse améliore son efficacité seulement quand l'activité des deux neurones qu'elle relie est corrélée.
- Les réseaux récurrents, permettent une inter-connectivité quasi totale entre les neurones des différentes couches, y compris éventuellement en se bouclant sur eux-mêmes. Ils permettent la résolution de problèmes qui ne peuvent être résolus de façon algorithmique.
- Le réseau de Hopfield est inspiré des modèles physiques des verres de spin et constitué d'éléments bistables à connexions symétriques évoluant spontanément vers une réduction de l'énergie totale du système. Associé avec la règle de Hebb, ce réseau peut apprendre à mémoriser les exemples présentés en entrée sous la forme d'états stables. En phase d'exploitation, les stimuli présentés en entrée évolueront dans le réseau vers l'état stable le plus ressemblant. Un réseau de Hopfield fonctionne ainsi comme un véritable classificateur à mémoire associative.
- Les réseaux compétitifs sont des réseaux où chaque neurone d'entrée est relié à chaque neurone de sortie et chaque neurone de sortie inhibe tous les autres et s'auto excite. Cette architecture génère une compétition inter-neurones aboutissant à ce que le réseau a tendance à reproduire l'organisation topographique des formes d'entrée.

Dans les dernières années, les RNA ont été appliqués dans plusieurs domaines d'analyse des réseaux électriques. Ceci inclut les prévisions des charges, l'évaluation de la sécurité statique et dynamique, la modélisation des charges dynamiques, les diagnostics de défaut et les processus d'alarme en plus de démonstrations significatives des capacités des RNA dans la modélisation et l'identification des systèmes. Ces applications ont donc bénéficié du développement important des calculateurs ainsi que des avantages de cette capacité de transformation et de leurs caractéristiques intrinsèques de paralléliser les calculs pour atteindre de grandes vitesses d'exécution [16].

Actuellement, un effort considérable a été orienté vers l'application des réseaux de neurones artificiels aux études des problèmes de stabilité transitoire des réseaux électriques. Ces méthodes sont basées sur des mesures directes des paramètres du réseau (écoulement des

puissances dans les lignes de transport, puissances des générateurs et des charges, angles internes des générateurs,...etc.). Cette approche constitue un véritable moyen pour la résolution de plusieurs problèmes, où les méthodes classiques ont montré leurs limites. A cause de leurs capacités d'adaptation, leur utilisation s'est avérée efficace dans les processus qui nécessitent une interaction avec l'environnement.

Plusieurs avantages peuvent être tirés de cette approche, où l'intérêt principal des réseaux de neurones artificiels réside dans le parallélisme de leur structure ce qui résultera en des vitesses de simulation élevées, ainsi on constate qu'ils peuvent être très adaptés aux applications en temps réel. Leurs capacités d'adaptation et de généralisation leur permettent d'adopter un comportement correct en réponse à des variables d'entrée qui n'ont pas été rencontrés lors de la phase d'apprentissage.

D'autre part, cette approche présente des handicaps pour la généralisation de son application pour une évaluation précise de la stabilité transitoire des grands réseaux d'énergie électrique. Elle nécessite aussi des exécutions en temps différé (phase d'apprentissage) ayant un temps de calcul très important.

Dans le chapitre III, des détails sur les fondements de base et les techniques d'utilisation des RNA ainsi que les méthodes d'optimisation du vecteur d'entrée sont développées.

I.4.d Méthodes hybrides

Pour faire face aux difficultés rencontrées par les différentes méthodes directes pour l'évaluation de la stabilité transitoire des réseaux d'énergie électrique, les chercheurs ont proposé des méthodes hybrides qui essaient de combiner entre les différentes approches en utilisant les avantages de chacune d'elles [17, 18].

La plus simple technique proposée consiste à utiliser, dans un premier lieu, les méthodes directes avec des modèles simplifiés du réseau d'énergie électrique pour la classification des différentes perturbations. Par la suite, on utilise la méthode d'intégration numérique avec des modèles détaillés pour une étude plus précise des perturbations jugées critiques.

Vers le début des années 1990, les recherches ont abouti à la méthode SIME (Single Machine Equivalent). Cette méthode hybride résulte de la combinaison de deux algorithmes de stabilité transitoire, à savoir l'intégration temporelle pas à pas appliquée aux réseaux multimachines et le critère d'égalité des aires appliqué sur un réseau monomachine équivalent que l'on

appellera OMIB (One Machine Infinite Bus). Cette combinaison fournit deux informations essentielles sur la stabilité transitoire, à savoir : l'identification des machines critiques (c'est-à-dire des machines responsables de la rupture éventuelle de synchronisme) et l'évaluation de la marge de stabilité [6].

Plus précisément, pour un scénario instable donné, définit par le point de fonctionnement du système avant défaut et par la contingence considérée, la méthode SIME commande le programme temporel d'abord dans la phase pendant défaut, puis dans la phase après défaut. Dès le début de cette dernière phase, utilisant les données du système multi machine fournies à chaque pas du programme, SIME construit des OMIB candidats et leur applique le critère d'égalité des aires. Le processus s'arrête dès qu'un de ces candidats est instable par ce critère. A ce moment, SIME identifie les machines critiques, déclare que cet OMIB candidat est le vrai OMIB et calcule la marge d'instabilité correspondante [6].

En rafraîchissant les paramètres de l'OMIB à chaque pas du programme temporel, SIME conserve la précision de ce programme ainsi que sont aptitude à traiter la modélisation et le scénario de stabilité voulus.

En même temps, en utilisant l'OMIB et le critère d'égalité des aires, la méthode élargie considérablement les possibilités du programme temporel par les outils suivants :

- Analyse rapide de la stabilité.
- Filtrage des contingences inintéressantes et classement, évaluation des contingences intéressantes.
- Analyse de sensibilité
- Commande (c'est-à-dire stabilisation)
- Descriptions et interprétations physiques multiformes fournies par l'OMIB et le critère d'égalité des aires.

I.5 Techniques d'optimisation

I.5.a Algorithmes Evolutionnaires

Les algorithmes évolutionnaires (Evolutionary Algorithms EA) font partie de la famille des algorithmes d'optimisation stochastiques inspirés d'un paradigme naturel, celui de l'évolution naturelle Darwinienne sous la lumière du néo-Darwinisme sur la génétique moderne.

Quel que soit le type de problème à résoudre, les EA opèrent selon les principes que la population est initialisée de façon dépendante du problème à résoudre, puis évolue de génération en génération à l'aide d'opérateurs de sélection, de recombinaison et de mutation.

Les Algorithmes Evolutionnaires partagent des traits communs du fait qu'ils se basent sur la simulation de l'évolution naturelle, en s'inspirant des principes du néo-Darwinisme [19].

Un algorithme Evolutionnaire type présente les caractéristiques suivantes :

- L'utilisation d'un processus d'apprentissage collectif d'une population d'individus.
- Les descendants d'un individu sont générés par des processus aléatoires : le croisement et la mutation.
- Le processus de sélection favorise la survie des meilleurs individus en se basant sur leur adaptation.

L'algorithme évolutionnaire de base est représenté par :

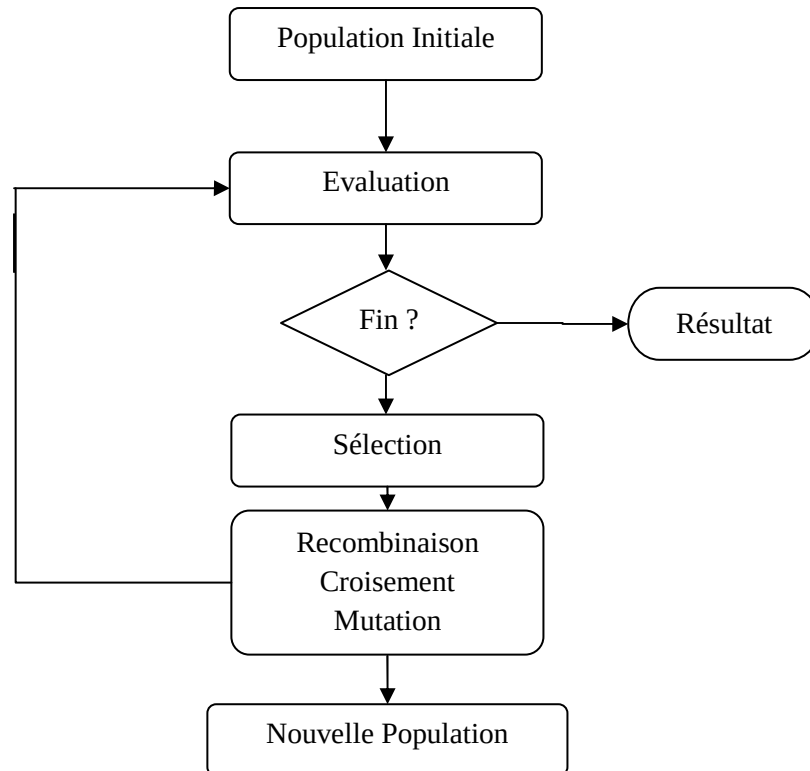


Figure I.2 : Principe d'un algorithme évolutionnaire standard

Le fait que les algorithmes évolutionnaires partagent les mêmes bases n'exclut pas l'existence de différences notables entre eux. Trois principales classes d'algorithmes évolutionnaires existent : les Algorithmes Génétiques, les Stratégies d'Evolution et la Programmation Evolutionnaire [19, 20].

- 1) **Les Algorithmes Génétiques** : développés par J. Holland en 1962, considèrent le croisement comme un opérateur de recherche le plus important dans l'espace des solutions potentielles, la mutation est considérée comme un opérateur secondaire avec un faible taux d'application. La sélection est stochastique et les individus sont souvent représentés en chaînes binaires, mais d'autres représentations peuvent être utilisées.
- 2) **Les Stratégies d'Evolution** : développées par Rechenberg et Schwefel en 1965, utilisent une mutation avec une distribution normale pour modifier les individus présentés comme des vecteurs de valeurs réelles. La mutation et le croisement sont les deux opérateurs de recherche dans l'espace des solutions potentielles et l'espace des paramètres de stratégies. La sélection peut être déterministe ou stochastique.

- 3) **La Programmation Evolutionnaire** : développée par J. Fogel en 1962 utilise la mutation comme seul opérateur de recherche. Appliquée aux problèmes d'optimisation continue, la Programmation Evolutionnaire est similaire aux stratégies d'Evolution, tous deux représentent les individus avec des vecteurs de valeurs réelles incluant les paramètres de stratégie. Elle utilise une mutation de distribution normale et une sélection déterministe ou stochastique.

En plus de ces algorithmes de base, d'autres algorithmes dérivés ont vu le jour, comme la programmation génétique, les Systèmes Classifiés et les Algorithmes Mémétiques ainsi que plusieurs méthodes hybrides.

I.5.b Méthode des Plans d'Expérience

La méthode des plans d'expériences est à la fois nouvelle et ancienne. Les scientifiques n'ont abordé ce sujet que depuis peu d'années. Les premiers qui se sont penchés sur ce problème sont des agronomes et des statisticiens. Les techniques et les notions qu'ils ont développées sont si générales qu'elles peuvent être utilisées dans beaucoup de domaines. Cette méthode est récente puisqu'on peut la faire démarrer avec les travaux de Fisher (début de vingtième siècle). Aussi bizarre que cela paraisse, elle ne porte pas encore de nom. Après 1945, les plans d'expériences suscitent de nombreuses publications et recherches dans le monde Anglo-Saxon. Des statisticiens comme Yate, Youden, Cochran, Plackett et Burman, et bien d'autres, enrichissent et divulguent la méthode. Box et Hunter, s'appuyant notamment sur les travaux de Yate, développent des méthodes particulières de construction de plans fractionnaires à deux niveaux [21].

Un plan d'expériences consiste à mettre en œuvre une stratégie de travail dans le but de réduire le nombre des essais tout en déterminant rapidement les effets des paramètres que l'expérimentateur juge influent sur le phénomène. La méthode des plans d'expériences cherchera à déterminer et à établir les liens existant entre la réponse et les paramètres d'entrées. Plus précisément, elle vise à comprendre les relations liant la réponse avec les facteurs. Pour cela, la solution proposée consiste à établir un modèle exprimant la réponse en fonction des facteurs.

Elle propose de préparer des programmes d'essais en fonction d'un modèle statistique établi, afin d'atteindre les objectifs fixés aux essais de la façon la plus efficace et la plus économique.

Les étapes principales de la méthode peuvent être représentés par :

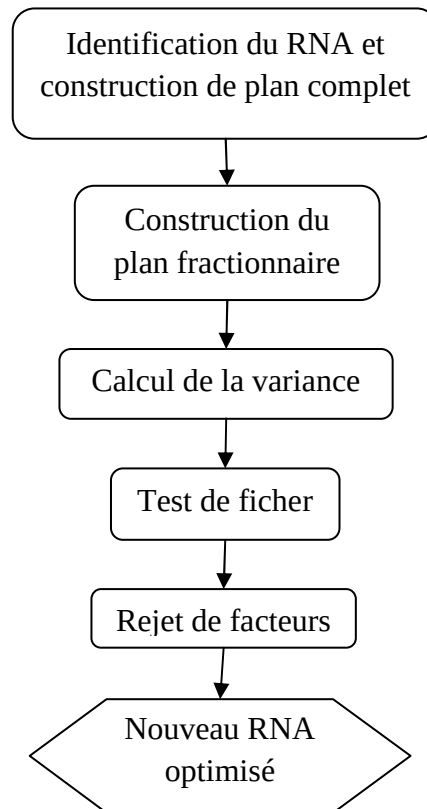


Figure I.3 : Principales étapes de la Méthode des Plans d'Expérience

Dans la suite du travail, une présentation de la méthode ainsi que ses fondements théoriques seront exposés. Nous allons présenter aussi son application dans le contexte de l'optimisation du vecteur d'entrée du réseau de neurones artificiels utilisé pour évaluer la stabilité transitoire d'un réseau d'énergie électrique.

I.6 Objectifs et Contributions

L'étude que nous présentons dans ce mémoire concerne l'évaluation de la stabilité transitoire des réseaux d'énergie électrique. Nous proposons une méthode d'analyse se basant sur la méthode d'intégration numérique et celle de la méthode des réseaux de neurones artificielles RNA.

Dans la méthode d'intégration numérique, la modélisation des générateurs prend en considération les régulateurs de tension et de vitesse. Un programme élaboré sous environnement MATLAB pour ce modèle (à deux axes) a permis la détermination de la trajectoire du système pendant et après le défaut.

Le résultat constitue la base d'apprentissage et de test permettant l'évaluation de la stabilité transitoire par la méthode des réseaux de neurones artificiels RNA optimisées par les plans d'expériences.

L'optimisation des entrées du réseau de neurones a été effectuée par le biais de la méthode des plans d'expériences. Le but est de trouver la meilleure combinaison qui permet d'évaluer la stabilité transitoire d'un réseau d'énergie électrique d'une façon précise et plus rapide.

Chapitre 11

Évaluation de la Stabilité Transitoire par Intégration Numérique

II.1 Introduction

La première étape de notre étude passe par la mise au point d'un modèle du réseau aussi détaillé que possible pour permettre de tenir compte de tous les types de comportement du réseau et des interactions possibles entre les différents éléments qui le composent.

De nos jours, la méthode pratique d'analyse de la stabilité transitoire la plus usitée est celle par intégration numérique, où les équations différentielles non linéaires sont résolues pas-à-pas. Dans le cas typique d'un grand réseau électrique, des centaines et dans certains cas des milliers d'équations différentielles et algébriques doivent être résolus à chaque pas d'intégration. Or toute étude de la dynamique du système d'énergie électrique, exige une modélisation adéquate des principaux éléments constituant le réseau.

Dans ce chapitre, une modélisation détaillée du système est introduite. Par la suite, un programme sera développé sous environnement MATLAB pour l'évaluation de la stabilité transitoire par intégration numérique utilisant l'algorithme d'Euler Modifié. Les résultats de simulation seront présentés en fin du chapitre.

II.2 Equations d'équilibre du système

Une étude de la stabilité transitoire suppose la connaissance de l'état stable de fonctionnement des machines avant l'apparition de la perturbation par un calcul d'écoulements de puissance (load-flow). Ce qui nous permet de déterminer les tensions et les flux des puissances (actives et réactives) dans le réseau.

Considérons un réseau d'énergie à $m+n$ nœuds, dont n nœuds de production et m nœuds de charge. L'équation de performance du réseau sous forme matricielle est donnée par la relation suivante [2, 3, 22, 23] :

$$\bar{I}_{Bus} = \bar{Y}_{Bus} \bar{V}_{Bus} \quad (II.1)$$

avec $\bar{V}_{Bus}$: vecteur des tensions complexes des nœuds de dimension $(n+m \times 1)$ mesurées par rapport au nœud de référence.

$\bar{I}_{Bus}$: vecteur des courants complexes injectés des nœuds de dimension $(n+m \times 1)$ (pris positifs lorsqu'ils circulent vers le réseau).

$\bar{Y}_{Bus}$: matrice nodale carrée des admittances complexes du réseau de transport d'énergie de dimension $(n+m \times n+m)$

Dont la matrice $\bar{Y}_{BUS}$ est donnée par :

- l'élément diagonal $\bar{Y}_{ii}$ est égal à la somme de toutes les admittances des éléments connectés au nœud i .
- l'élément non diagonal $\bar{Y}_{ik}$ est égal à la valeur négative de l'admittance de l'élément connectant les nœuds i et k . S'il n'y a pas de connexion entre les nœuds i et k alors l'élément correspondant est nul.

Pour un nœud balancier i (slack-bus), la tension est donnée pendant que les puissances active et réactive ne sont pas spécifiées, l'équation de performance (II.1) peut se transformer en un ensemble de $(n+m-1)$ équations algébriques complexes simultanées de la forme :

$$\bar{V}_i = \frac{1}{\bar{Y}_{ii}} \left(\bar{I}_i - \sum_{j=1, j \neq i}^{n+m} \bar{Y}_{ij} \bar{V}_j \right) \quad (i = 1, \dots, n+m; i \neq \text{nœud balancier}) \quad (\text{II.2})$$

La puissance complexe injectée au nœud i est donnée par le produit de la tension complexe et le courant complexe conjugué :

$$P_i + j Q_i = \bar{V}_i \bar{I}_i^* \quad (\text{II.3})$$

De l'équation (II.3), on peut avoir l'expression des courants complexes injectés au nœud i :

$$\bar{I}_i = \frac{P_i - j Q_i}{\bar{V}_i^*} \quad (\text{II.4})$$

Substituant l'équation (II.4) dans (II.2), on peut avoir l'équation de base de calcul d'écoulement de puissance :

$$\bar{V}_i = \frac{1}{\bar{Y}_{ii}} \left(\frac{P_i - j Q_i}{\bar{V}_i^*} - \sum_{j=1, j \neq i}^{n+m} \bar{Y}_{ij} \bar{V}_j \right) \quad (\text{II.5})$$

$i = 1, \dots, n+m; i \neq \text{nœud balancier}$.

Les $(n+m-1)$ équations algébriques simultanées données par (II.5) décrivent complètement la performance du système en état d'équilibre sont non linéaires. Pour les résoudre, différentes méthodes numériques sont proposées dans la littérature. Dans notre étude, on opte pour la résolution par la méthode itérative de Gauss-Seidel.

La solution de ces équations donne les tensions complexes du système en tous les nœuds du réseau. Par la suite, on peut calculer directement les transits de puissance active et réactive dans les lignes, les puissances du nœud balancier ainsi que les pertes totales dans le système.

II .3 Modélisation des lignes de transmission

Les lignes moyennes de transport sont représentées par une impédance série qui tient compte de l'effet résistif et inductif avec deux admittances en parallèle pour tenir compte de l'effet capacitif de la ligne [24].

On définit :

y_i : admittance shunt total de la ligne.

R_{ij} : résistance de la ligne.

X_{ij} : réactance de la ligne.

Les expressions pour l'admittance y_i et l'impédance z_{ij} sont donnés par :

$$y_i = j\omega C_i \quad (\text{II.6})$$

$$z_{ij} = R_{ij} + jX_{ij} \quad (\text{II.7})$$

Le schéma équivalent en Π de la ligne est donné par la figure II.1

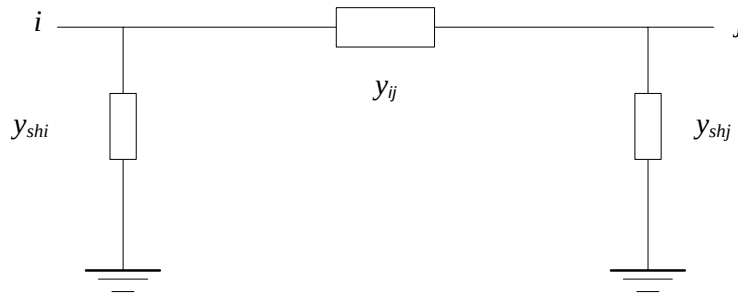


Figure II.1 : Schéma équivalent en Π d'une ligne moyenne de transport

où :

$$y_{ij} = \frac{1}{R_{ij} + jX_{ij}} \quad (\text{II.8})$$

$$y_{shi} = y_{shj} = \frac{y_i}{2} \quad (\text{II.9})$$

II .4 Modélisation des charges

Généralement dans les études de la stabilité transitoire, la modélisation des charges autre que les moteurs, peuvent être représentées par des impédances ou admittances statiques vers la terre, courant d'amplitude constant et de phase variable, puissances actives et réactives constantes ou bien une combinaison des trois représentations.

Dans le cas des charges assimilées à des impédances constantes, ces impédances placées entre les nœuds consommateurs et la terre sont calculées après résolution des équations d'écoulement de puissance du système avant défaut par :

$$Z_{io} = \frac{V_i^2}{P_i - jQ_i} \quad (\text{II.10})$$

P_i, Q_i : charge du nœud i donnée par la solution d'écoulement de puissance.

V_i : tension au nœud i donnée par la solution d'écoulement de puissance.

Le courant circulant du nœud i vers la terre avant défaut est donnée par :

$$I_{io} = \frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} \quad (\text{II.11})$$

L'admittance statique y_{io} qui va être utilisé pour représenter la charge pendant la période transitoire est donnée par :

$$y_{io} = \frac{I_{io}}{V_i^*} = \frac{S_{io}^*}{V_i^2} \quad (\text{II.12})$$

II.5 Equation mécanique du rotor

La phase la plus importante qui concerne la stabilité transitoire est l'analyse de la dynamique des rotors des générateurs pendant cette période. Les équations différentielles décrivant ce mouvement sont appelées équations mécaniques (swing équations) dû à la nature oscillatoire des angles rotoriques. Ces derniers sont mesurés par rapport à un repère de référence tournant au synchronisme. Les équations mécaniques peuvent être développées en utilisant les lois fondamentales de la mécanique.

Le mouvement d'une machine est gouverné par la loi de Newton [3]:

$$T_{net} = I\alpha \quad (\text{II.13})$$

où

α : accélération \ décelération du rotor de la machine.

T_{net} : le couple net responsable de α

I : inertie du rotor du groupe turbo alternateur (turbine, générateur et excitatrice)

L'énergie cinétique emmagasinée du rotor en rotation est donnée par :

$$E_{KE} = \frac{1}{2} I \omega_m^2 \quad (\text{II.14})$$

où ω_m est la vitesse angulaire mécanique du rotor.

Les différents couples agissant sur le rotor sont [3] :

- **Le couple électromagnétique** composé de deux parties :
 1. le couple de synchronisation (T_g) en phase avec l'angle rotorique (il est aussi connu par le couple de l'entrefer). Il est égal au couple électromagnétique dans la machine et représente le taux de changement de l'énergie électromagnétique totale emmagasinée par rapport à l'angle rotorique.
 2. le couple amortisseur (T_E) qui est en phase avec la vitesse du rotor. C'est le résultat de la réaction des circuits électromagnétiques du rotor (les amortisseurs et le corps cylindrique solide du rotor) contre tout fonctionnement asynchrone de la machine.
- **Le couple amortisseur** T_M due à la turbine, ses contrôles et aux systèmes de régulation du bloc turboalternateur. On peut combiner ce dernier avec (T_E) pour obtenir un seul couple amortisseur (T_D), proportionnel aux variations de la vitesse rotorique.
- **Le couple mécanique d'entrée** (T_m), qui est le couple d'entraînement délivré par la turbine (sans les pertes rotation).

Le couple net du groupe turbo alternateur est donné par :

$$T_{net} = T_m - T_g - T_D \quad (\text{II.15})$$

Si les générateurs sont représentés par des modèles détaillés (avec régulateurs de tension et de vitesse), le couple net est donné par :

$$T_{net} = T_m - T_g \quad (\text{II.16})$$

α dans (II.13) peut être exprimé en terme de l'angle mécanique du rotor mesuré par rapport à une structure stationnaire de référence par :

$$\alpha = \frac{d^2 \theta_m}{dt^2} = \frac{d\omega_m}{dt} \quad (\text{II.17})$$

où θ_m est l'angle rotorique mécanique.

Supposons que le rotor tourne avec une vitesse angulaire de référence ω_{m0} , alors l'angle rotorique croît uniformément avec le temps. Pour des raisons pratiques, on définit l'angle rotorique δ_m comme suit :

$$\delta_m = \theta_m - (\omega_{m0}t + \theta_0) \quad (\text{II.18})$$

avec

δ_m : angle rotorique mécanique mesuré par rapport à la référence tournante en synchronisme.

ω_{m0} : vitesse mécanique angulaire rotorique de référence.

θ_m : angle mécanique rotorique avant la perturbation ($t=0$).

θ_0 : angle constant égale à $\frac{\pi}{2}$.

α dans (II.11) peut être exprimée en fonction de δ_m par :

$$\alpha = \frac{d^2\theta_m}{dt^2} = \frac{d^2\delta_m}{dt^2} \quad (\text{II.19})$$

Substituant les équations (II.15) et (II.19) dans l'équation (II.13), on obtient :

$$I \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = T_{net} = T_m - T_g - T_D \quad (\text{II.20})$$

Multipliant les deux côtés de l'équation (II.20) par ω_m , on obtient :

$$M \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = P_{net} = P_m - P_g - P_D \quad (\text{II.21})$$

avec :

$$M = I \omega_m \quad (\text{II.22})$$

M : étant le moment d'inertie du groupe turbo-alternateur.

Généralement M est pris constant vu la faible variation de la vitesse rotorique pendant la période transitoire (2 à 4%), il est donné par :

$$M = I \omega_{m0} \quad (\text{II.23})$$

Dans la formulation de l'équation mécanique, on utilise par convention l'angle électrique du rotor δ_e qui est reliée à l'angle mécanique par :

$$\delta_e = \frac{p}{2} \delta_m \quad (\text{II.25})$$

où p est le nombre de pôles de la machine.

En substituant (II.14) dans (II.18), on obtient :

$$\delta_e = \frac{p}{2} \delta_m = \theta_e - (\omega_{e0} t + \theta_{e0}) \quad (\text{II.25})$$

avec :

$$\theta_e = \frac{p}{2} \theta_m \quad (\text{II.26})$$

$$\omega_{e0} = \frac{p}{2} \omega_{m0} \quad (\text{II.27})$$

Pour remplacer $\frac{p}{2}$ par des quantités conventionnelles, introduisons :

N_0 : vitesse de base de l'arbre rotorique en tours par minute (tr/mn).

f_0 : fréquence électrique de base de la machine en Hz.

En rappelant les relations suivantes [2, 3, 22] :

$$\frac{N_0}{60} \frac{p}{2} = f_0 \quad (\text{II.28})$$

$$\omega_{m0} = \frac{2\pi N_0}{60} \quad (\text{II.29})$$

Substituant (II.28) dans (II.24) pour $\frac{p}{2}$, on obtient :

$$\delta_e = \frac{60 f_0}{N_0} \delta_m \quad (\text{II.30})$$

L'angle électrique δ_e est connu aussi par différentes appellations : angle de charge, angle de puissance ou aussi angle de couple.

Dérivant l'équation (II.29) par rapport au temps et substituant le résultat dans (II.20), on obtient une autre forme de l'équation mécanique qui contient l'angle électrique :

$$\left(I \frac{N_0}{60} \frac{1}{f_0} \right) \frac{d^2 \delta_e}{dt^2} = T_m - T_g - T_D \quad (\text{II.31})$$

Le paramètre le plus important qui affecte directement la stabilité d'un réseau d'énergie électrique est la constante d'inertie H défini par le rapport entre l'énergie cinétique emmagasinée à la vitesse de base et la puissance apparente de base du réseau.

$$H = \frac{\text{Energie cinétique emmagasinée à la vitesse de base}}{\text{Puissance de base du réseau}} \quad (\text{II.32})$$

En introduisant la puissance apparente de base $S_{B(3\phi)}$, on obtient l'expression suivante :

$$H = \frac{\frac{1}{2} I \omega_{m0}^2}{S_{B(3\phi)}} \quad (\text{II.33})$$

Substituant les expressions de N_0 et I , pris respectivement des équations (II.29) et (II.33), dans l'équation mécanique (II.31), on obtient :

$$\left(\frac{2HS_{B(3\phi)}}{\omega_{m0}} \frac{1}{2\pi f_0} \right) \frac{d^2 \delta_e}{dt^2} = T_m - T_g - T_D \quad (\text{II.34})$$

Multipliant les deux membres de l'équation (II.34) par ω_m et supposant que le changement de la vitesse de l'arbre pendant la période transitoire n'est pas significatif par rapport à la vitesse de base ($\frac{\omega_m}{\omega_{m0}} \cong 1$), et supposant aussi que les pertes électriques sont négligeables :

$$M \frac{d^2 \delta_e}{dt^2} = P_m - P_g - P_D \quad (\text{II.35})$$

M est donné par l'expression suivante :

$$M = \frac{HS_{B(3\phi)}}{\pi f_0} \quad (\text{II.36})$$

Le coefficient d'amortissement D est relié avec la puissance d'amortissement par :

$$P_D = D \frac{d\delta_e}{dt} \quad (\text{II.37})$$

Introduisons le coefficient d'amortissement D dans l'équation (II.35), ce qui donne :

$$M \frac{d^2 \delta_e}{dt^2} + D \frac{d\delta_e}{dt} = P_m - P_e \quad (\text{II.38})$$

Malgré les hypothèses introduites pour arriver à cette équation, cette dernière reste très utilisée dans les études de la stabilité des réseaux d'énergie électrique et surtout dans les méthodes directes d'évaluation de la stabilité transitoire.

L'équation mécanique est donnée par :

$$M^* \frac{d^2 \delta_e}{dt^2} + D^* \frac{d\delta_e}{dt} = P_m^* - P_e^* \quad (\text{II.39})$$

avec :

$$M^* = \frac{H}{\pi f_0} \quad (\text{II.40})$$

À partir des équations (II.18), (II.19), (II.25) et (II.26), on peut avoir le modèle des équations différentielles dites de second ordre d'une machine synchrone [3] :

$$\frac{d\delta_e}{dt} = \omega - \omega_0 \quad (\text{II.41})$$

$$M^* \frac{d\omega}{dt} + D^* (\omega - \omega_0) = P_m^* - P_e^* \quad (\text{II.42})$$

où ω est la vitesse électrique rotorique.

II.6 Equation électrique de l'alternateur

II.6.a Transformation de Park

La machine synchrone triphasée se compose de trois enroulements de phase noté a , b , et c au niveau du stator et d'un enroulement d'excitation noté f au niveau du rotor, dont l'axe magnétique est l'axe direct noté d . Elle contient également un certain nombre de barres d'amortissement formant des circuits symétriques par rapport aux axes direct et en quadrature. Ces derniers peuvent être représentés avec une bonne approximation par deux circuits équivalents notés D et Q suivant les axes direct et en quadrature. La figure II.2 donne une représentation schématique de la machine synchrone [8].

Considérons les trois phases du stator comme générateurs de courant et l'enroulement inducteur comme récepteur. Lorsque la saturation des circuits magnétique est négligée, l'application de la loi d'Ohm à chacun des six enroulements de la figure (II.2) conduit aux équations suivantes :

Pour les trois circuits du stator :

$$V_a = -R_a I_a - \frac{d\Phi_a}{dt} \quad (\text{II.43})$$

$$V_b = -R_b I_b - \frac{d\Phi_b}{dt} \quad (\text{II.44})$$

$$V_c = -R_c I_c - \frac{d\Phi_c}{dt} \quad (\text{II.45})$$

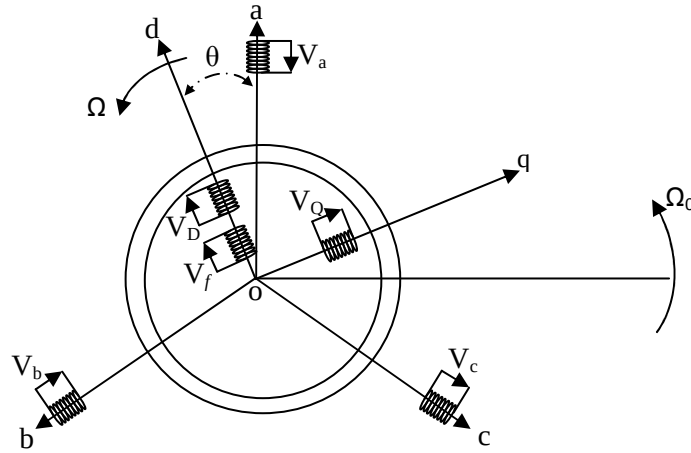


Figure II.2 : Représentation de la machine synchrone

Pour les circuits du rotor :

$$V_f = R_f I_f + \frac{d\Phi_f}{dt} \quad (\text{II.46})$$

$$0 = R_D I_D - \frac{d\Phi_D}{dt} \quad (\text{II.47})$$

$$0 = R_Q I_Q - \frac{d\Phi_Q}{dt} \quad (\text{II.48})$$

avec V_f : la tension aux bornes de l'enroulement k .

Φ_f : le flux dans l'enroulement k .

I_f : le courant dans l'enroulement k .

$K = a, b, c, f, D \text{ et } Q$.

La transformation de Park (décomposition selon les axes d et q) peut s'interpréter comme la substitution des trois enroulements de phase (a , b , et c) immobiles par rapport au stator, par deux enroulement d et q tournant à la vitesse rotorique, ayant pour axes magnétiques respectivement l'axe direct et l'axe en quadrature (figure II.3). La matrice de transformation de Park s'écrit [8] :

$$P = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \sin \theta & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} \quad (\text{II.49})$$

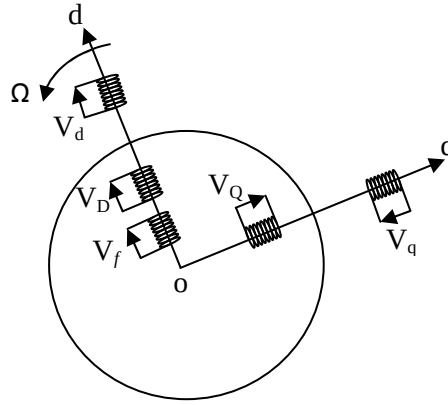


Figure II.3 : Représentation bipolaire de la machine synchrone

L'application de celle-ci aux équations (II.43), (II.44) et (II.45) conduit aux équations électriques suivantes :

$$V_d = -R_d I_d - \Phi_d \frac{d\theta}{dt} + \frac{d\Phi_d}{dt} \quad (\text{II.50})$$

$$V_q = -R_q I_q - \Phi_q \frac{d\theta}{dt} + \frac{d\Phi_q}{dt} \quad (\text{II.51})$$

Les équations magnétiques reliant les courants et les flux dans les différents enroulements se décomposent alors en deux sous-systèmes linéaires (un pour chacun des deux axes), ces dernières s'écrivant sous la forme :

$$\begin{pmatrix} \Phi_d \\ \Phi_f \\ \Phi_D \end{pmatrix} = \frac{1}{\omega} \begin{pmatrix} X_d & X_{df} & X_{dD} \\ \sqrt{\frac{2}{3}} X_{fd} & X_f & X_{fD} \\ \sqrt{\frac{2}{3}} X_{Dd} & X_{Df} & X_D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_d \\ I_f \\ I_D \end{pmatrix} \quad (\text{II.52})$$

$$\begin{pmatrix} \Phi_q \\ \Phi_Q \end{pmatrix} = \frac{1}{\omega} \begin{pmatrix} X_q & X_{qQ} \\ \sqrt{\frac{2}{3}} X_{Qq} & X_Q \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_q \\ I_Q \end{pmatrix} \quad (\text{II.53})$$

avec :

Φ_k : le flux dans l'enroulement k .

I_f : le courant dans l'enroulement k .

X_{kl} : la réactance mutuelle entre les enroulements k et l .

X_d et X_d : réactances synchrones dans le modèle de réseau d'énergie électrique, il est préférable de travailler avec des grandeurs normalisées par rapport aux grandeurs nominales, ces grandeurs réduites sont exprimées en pu.

Pour la vitesse on prend :

$$\omega_b = 2 \pi f \quad (\text{II.54})$$

Pour la tension :

$$V_b = R_b I_b = \omega_b \Phi_b \quad (\text{II.55})$$

Pour le flux :

$$\Phi_b = \frac{X_b I_b}{\omega_b} \quad (\text{II.56})$$

Les valeurs réduits sont alors définies par :

$$i_k = \frac{I_k}{I_b}, \phi_k = \frac{\Phi_k}{\Phi_b}, v_k = \frac{V_k}{V_b}, r_k = \frac{R_k}{R_b} \quad (K = d, q, f, D \text{ et } Q) \quad (\text{II.57})$$

Les équations (II.46), (II.47), (II.48), (II.50) et (II.51), exprimées en valeurs réduites prennent respectivement les formes suivantes :

$$0 = r_D I_D - \frac{d\phi_D}{dt} \quad (\text{II.58})$$

$$0 = r_Q I_Q - \frac{d\phi_Q}{dt} \quad (\text{II.59})$$

$$v_d = -r_d I_d - \phi_d \omega + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\phi_d}{dt} \quad (\text{II.60})$$

$$v_q = -r_q I_q - \phi_q \omega + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\phi_q}{dt} \quad (\text{II.61})$$

$$v_f = r_f i_f + \frac{d\phi_f}{dt} \quad (\text{II.62})$$

On peut aussi rendre la matrice des deux systèmes (II.52) et (II.53) symétriques par un choix approprié des grandeurs de base pour les réactances. L'équation magnétique matricielle en valeurs réduite s'écrit alors :

$$\begin{pmatrix} \phi_d \\ \phi_f \\ \phi_D \\ \phi_q \\ \phi_Q \end{pmatrix} = \frac{1}{\omega} \begin{pmatrix} x_d & x_{md} & x_{md} & 0 & 0 \\ x_{md} & x_f & x_{md} & 0 & 0 \\ x_{md} & x_{md} & x_D & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & x_q & x_{mq} \\ 0 & 0 & 0 & x_{mq} & x_Q \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_d \\ i_f \\ i_D \\ i_q \\ i_Q \end{pmatrix} \quad (\text{II.63})$$

Considérons (II.61) et (II.62), nous allons faire les hypothèses suivantes, généralement adoptées dans les études du régime transitoire des machines synchrones [8].

En supposant que les *f.e.m* de transformation sont négligeables devant les *f.e.m* de rotation (les variations du module du flux sont négligeables devant les variations dues à la rotation) :

$$\frac{d\phi_d}{dt} \ll \omega\phi_d \text{ \& \& } \frac{d\phi_q}{dt} \ll \omega\phi_q \quad (\text{II.64})$$

La tension aux bornes de la résistance statorique est négligeable devant la *f.e.m* de rotation. Pour le stator, on aboutit donc aux équations suivantes :

$$v_d = -\omega\phi_d \quad (\text{II.65})$$

$$v_q = -\omega\phi_q \quad (\text{II.66})$$

L'ensemble des équations (II.58), (II.59), (II.60), (II.63), (II.65) et (II.66) permet d'étudier le régime transitoire électrique de la machine.

II.6.b Détermination des paramètres de la machine

Considérons la figure (II.2), si l'enroulement amortisseur *D* d'axe direct n'est pas considéré, l'équation magnétique matricielle (II.56) en valeurs réduites devient :

$$\begin{pmatrix} \phi_d \\ \phi_f \\ \phi_q \\ \phi_Q \end{pmatrix} = \frac{1}{\omega} \begin{pmatrix} x_d & x_{md} & 0 & 0 \\ x_{md} & x_f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & x_q & x_{mq} \\ 0 & 0 & x_{mq} & x_Q \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_d \\ i_f \\ i_q \\ i_Q \end{pmatrix} \quad (\text{II.67})$$

Pour tenir compte des fuites dans les enroulements posons :

$$x_{1f} = x_f - x_{md} \quad (\text{II.68})$$

$$x_{1q} = x_q - x_{mq} \quad (\text{II.69})$$

On peut représenter la machine synchrone par les schémas équivalents sur les deux axes présentés par la figure II.4 [3].

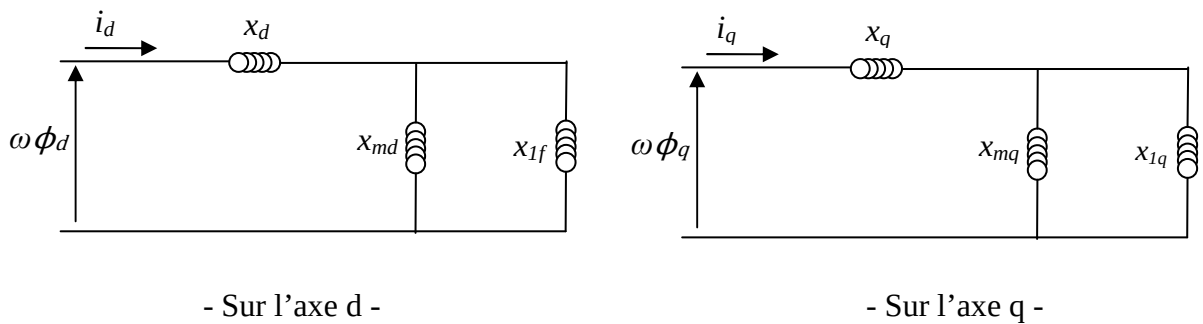


Figure. II.4 Représentation magnétique de la machine synchrone

A partir de ces schémas nous pouvons définir :

- Les réactances transitoires directe et en quadrature notées respectivement x'_d et x'_q :

$$x'_d = x_d + \frac{x_{md}x_{1f}}{x_{1f} + x_{md}} \quad (\text{II.70})$$

$$x'_q = x_q + \frac{x_{md}x_{1Q}}{x_{1Q} + x_{md}} \quad (\text{II.71})$$

- Les constantes de temps transitoires d'axe direct (respectivement d'axe en quadrature) notées T'_{d0} (resp. T'_{q0}) et données par :

$$T'_{d0} = \frac{1}{\omega r_f} (x_{1f} + x_{md}) \quad (\text{II.72})$$

$$T'_{q0} = \frac{1}{\omega r_f} (x_{1Q} + x_{mq}) \quad (\text{II.73})$$

Afin de déterminer les équations du modèle de la machine, quelques changements de variables sont effectués, posons :

$$e'_q = \omega \frac{x_{md}}{x_f} \phi_f \quad (\text{II.74})$$

$$e'_d = -\omega \frac{x_{mq}}{x_Q} \phi_Q \quad (\text{II.75})$$

$$e_{ex} = \frac{x_{md}}{r_f} v_f \quad (\text{II.76})$$

avec : e'_q : f.e.m transitoire d'axe direct.

e'_d : f.e.m transitoire d'axe transversal.

e_{ex} : tension de l'excitatrice.

II.6.c Expression de la tension terminale

Pour la composante directe, nous avons :

$$v_d = -x_q i_q - x_{mq} i_Q \quad (\text{II.77})$$

En remplaçant i_Q par son expression (II.67), nous obtenons :

$$v_d = e'_d - x'_q i_q \quad (\text{II.78})$$

Pour celle en quadrature, on peut écrire :

$$v_q = -x_d i_d - x_{md} i_f \quad (\text{II.79})$$

En remplaçant par son expression (II.67), nous obtenons :

$$v_q = e'_q - x'_d i_d \quad (\text{II.80})$$

En notation complexe, la tension aux bornes de la machine dans le repère (d, q) s'écrit sous la forme :

$$\bar{V}_{tr} = v_q + jv_d \quad (\text{II.81})$$

De la même manière, pour la *f.e.m* interne et le courant dans le stator nous avons les expressions suivantes :

$$\bar{e}'_r = e'_q + je'_d \quad (\text{II.82})$$

$$\bar{i}_r = i_q + ji_d \quad (\text{II.83})$$

Compte tenu des équations (II.78) et (II.80), l'expression complexe de la tension aux bornes de la machine devient :

$$\bar{V}_{tr} = \bar{e}'_r - jx'_d \bar{i}_r + j(x'_d - x'_q) i_q \quad (\text{II.84})$$

La représentation de Fresnel correspondante est illustrée sur la figure suivante :

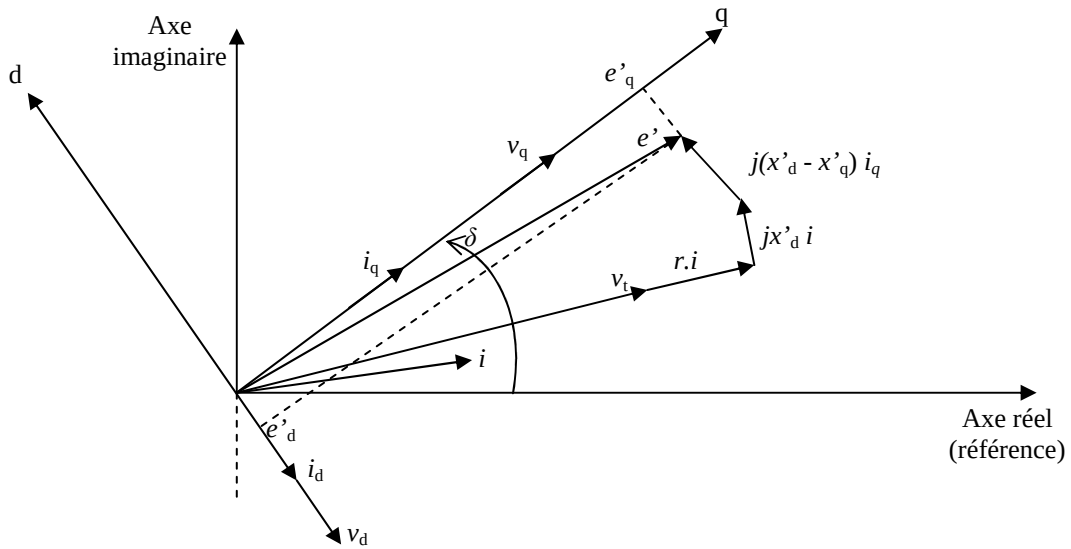


Figure. II.5 Représentation vectorielle de la machine synchrone

La machine synchrone est alors modélisée dans ce cas, par le schéma électrique monophasé représenté par la figure (III.6).

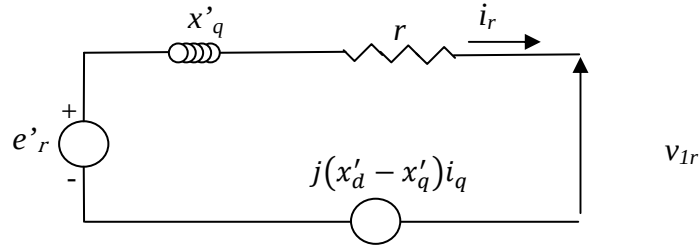


Figure. II.6 : Schéma électrique monophasé équivalent de la machine synchrone

II.6.d Expression dynamiques de la machine

1. Variation de la f.e.m transitoire d'axe transversal

Considérons l'équation (II.58) relative aux variations du flux dans l'enroulement inducteur :

$$\frac{d\phi_f}{dt} = v_f - r_f i_f \quad (\text{II.85})$$

avec :

$$i_f = \frac{1}{x_f} (\omega \phi_f - x_{mf} i_d) \quad (\text{II.86})$$

L'équation dynamique de la f.e.m transitoire d'axe transversal e'_q s'écrit donc :

$$\frac{de'_q}{dt} = \frac{1}{T'_{d0}} (e_{ex} - e'_q + (x_d - x'_d) i_d) \quad (\text{II.87})$$

2. Variation de la f.e.m transitoire d'axe direct

L'équation régissant les variations du flux dans l'enroulement amortisseur est donnée par :

$$\frac{d\phi_Q}{dt} = -r_Q i_Q \quad (\text{II.88})$$

avec :

$$i_Q = \frac{1}{x_Q} (\omega \phi_Q - x_{mQ} i_q) \quad (\text{II.89})$$

L'équation dynamique de la f.e.m transitoire d'axe direct e'_d s'écrit donc :

$$\frac{de'_d}{dt} = \frac{1}{T'_{q0}} (-e'_q + (x_q - x'_q) i_q) \quad (\text{II.90})$$

Le modèle à deux axes de la machine est donné par :

- Les équations dynamiques (II.87) et (II.90)
- Les équations mécaniques (II.41) et (II.42)

3. Expression de la puissance électrique

La puissance électrique développée par le générateur est donnée par :

$$P_e = v_d i_d + v_q i_q \quad (\text{II.91})$$

Remplaçant v_d et v_q par ses expression (II.78) et (II.80), on obtient :

$$P_e = e'_d i_d + e'_q i_q + (x'_d - x'_q) i_d i_q \quad (\text{II.92})$$

II.7 Organes de régulation de la machine

Pour une analyse plus réaliste, il faut prendre en considération les effets des systèmes de régulation de tension et de vitesse. En effet, la fréquence est l'expression électrique de la vitesse de rotation des alternateurs. En régime permanent, les machines, rendues solidaires par le couple synchrone, tournent toutes à la même vitesse. La variation de vitesse due au déséquilibre entre la puissance mécanique et la puissance électrique montre que les actions correctrices sur l'une des deux puissances peuvent être bénéfiques pour le maintien de la stabilité. Le choix de ces organes de commande peut non seulement améliorer le comportement statique mais avoir un effet important sur le comportement transitoire de la machine. Aussi le réglage primaire de la tension permet de contenir les variations aléatoires de la charge et éviter des changements de topologie suite à des chutes de tension et par suite améliorer le comportement dynamique du système d'énergie.

II.7.a Structure de régulateur de tension

Pour la tension, le réglage s'effectue par action sur la tension d'excitation commandant le courant dans l'enroulement inducteur. Cette variation prend en compte les seuils de surexcitation et de sous excitation [26]. Nous considérons une structure de premier ordre pour la régulation de tension. Le régulateur de tension a une influence sur la puissance électrique développée par la machine; le schéma bloc de ce régulateur est comme suit :

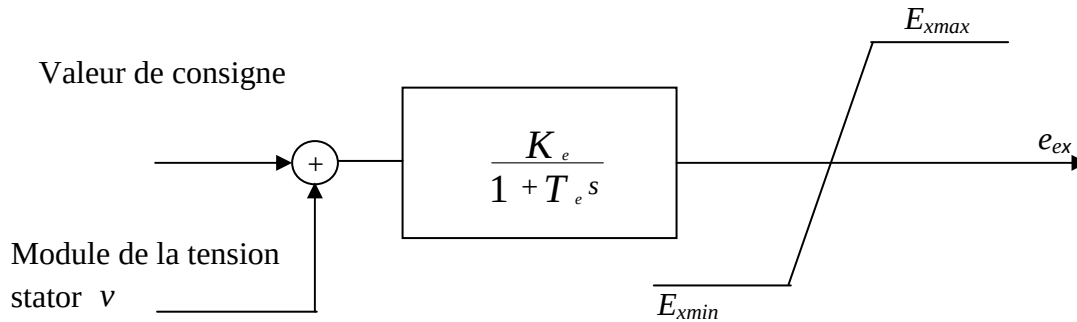


Figure II.7 : Structure du régulateur de tension

L'équation différentielle régissant la dynamique de la tension de l'excitatrice est donnée par l'expression suivante :

$$\frac{de_{ex}}{dt} = \frac{1}{T_e} (-e_{ex} + e_{ex0} + K_e (v_{ref} - v)) \quad (II.96)$$

Les seuils de surexcitation et de sous excitation sont pris en compte de la manière suivante :

$$e_{ex} = E_{xma} \quad \text{pour} \quad e_{ex} \geq E_{xma} \quad (II.97)$$

$$e_{ex} = E_{xmi} \quad \text{pour} \quad e_{ex} \leq E_{xmi} \quad (II.98)$$

où : e_{ex0} : valeur initial de la tension de l'excitatrice.

K_e : gain statique.

T_e : constante de temps de régulateur.

v : module de la tension au stator.

E_{xma} : seuil de surexcitation.

E_{xmi} : seuil de sous excitation.

II.7.b Structure de régulateur de vitesse

Pour le réglage de la vitesse de rotation du groupe, nous prenons un régulateur de type PID (Proportionnel Intégral Dérivé) avec la prise en compte des limites sur la puissance mécanique. La commande de vitesse est effectuée par un ajustement de la puissance mécanique. La fonction de transfert de ce régulateur s'exprime de la manière suivante [27] :

$$\frac{\Delta C_m(s)}{\Delta \omega(s)} = -\frac{1 + \sigma s}{\gamma + \tau s} \quad (II.99)$$

avec :

$\Delta C_m(s)$: Variation du couple moteur développé par la turbine

$\Delta \omega(s)$: Variation de la pulsation

σ : Dosage accélérométrique

γ : Taux de statisme

τ : Promptitude

Cette fonction de transfert peut s'écrire aussi sous la forme suivante :

$$\frac{\Delta p_m(s)}{\Delta \omega(s)} = -K_v \frac{1 + \sigma s}{1 + T_v s} \quad (II.100)$$

avec : $K_v = \frac{\Omega_0}{\gamma S_n}$; K_v le gain statique du régulateur.

$$T_v = \frac{\tau}{\gamma} \quad ; T_v \text{ constante de temps.}$$

Le schéma bloc de ce régulateur est celui de la figure (II.8).

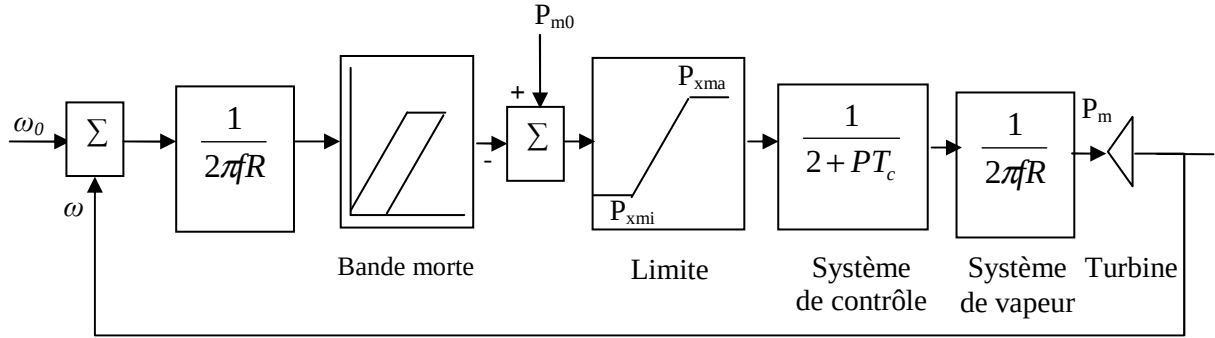


Figure II.8 : Structure du régulateur de vitesse

L'équation d'évolution de la puissance mécanique s'écrit :

$$\frac{dp_m}{dt} = \frac{1}{T_v} \left(-p_m + p_{mref} - K_v \left\{ \omega + \sigma \frac{d\omega}{dt} \right\} \right) \quad (\text{II.101})$$

Les limites sur la puissance mécanique sont prises en compte de la manière suivante :

$$p_m = p_{xma} \quad \text{pour} \quad p_m \geq p_{xma} \quad (\text{II.102})$$

$$p_m = p_{xmi} \quad \text{pour} \quad p_m \leq p_{xmi} \quad (\text{II.103})$$

La représentation à deux axes de la dynamique des machines pendant le régime transitoire permet de tenir en compte de la variation de la *f.e.m* transitoire et permet la prise en considération des régulateurs de tension et de vitesse.

II.8 Equations de performances

Le réseau peut être modélisé par un système d'équation linéaire reliant les courants injectés aux nœuds et les tensions aux bornes des générateurs.

En écrivant ces équations sous forme matricielle dans le repère synchrone, nous aurons :

$$\bar{\underline{i}}_R = \underline{Y} \bar{\underline{V}}_R \quad (\text{II.104})$$

avec :

y : matrice nodale carré de dimension $(n+m) \times (n+m)$, déterminée en ajoutant à la matrice Y les éléments représentant les charges du système.

$\bar{i}_R$: vecteurs courants à $(n+m)$ éléments.

$\bar{v}_R$: vecteurs tensions à $(n+m)$ éléments.

En distinguant les nœuds machines des nœuds internes, l'équation (II.104) peut s'écrire :

$$\begin{pmatrix} \bar{i}_a \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y_{aa} & y_{ab} \\ y_{ba} & y_{bb} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{v}_a \\ \bar{v}_b \end{pmatrix} \quad (\text{II.105})$$

Nous déduisant alors la relation matricielle réduite aux nœuds machines :

$$\bar{i}_R = y_{rr} \bar{v}_R \quad (\text{II.106})$$

$$\text{avec: } y_{rr} = y_{aa} - y_{ab} y_{bb}^{-1} y_{ba} \quad (\text{II.107})$$

L'équation (II.106) représente le réseau réduit à ces nœuds machines.

On peut également écrire la relation (II.106) en fonction des forces électromotrices transitoires des machines en incluant dans la matrice y_{rr} les réactances transitoires. Nous avons alors l'expression suivante qui lie les courants injectés aux nœuds producteurs aux *f.e.m* transitoires des générateurs :

$$\bar{i}_R = y_{re} \bar{e}_R' \quad (\text{II.108})$$

avec

$\bar{i}_R$: vecteurs courants injectés aux nœuds producteurs à n éléments.

$\bar{e}_R'$: vecteurs des *f.e.m* transitoires des machines à n éléments.

y_{re} : matrice admittance réduite aux nœuds générateurs du réseau de dimension $(n \times n)$.

Les éléments de y_{re} sont données par :

$$\bar{y}_{reij} = G_{ij} + jB_{ij} \quad j = 1, \dots, n \quad (\text{II.109})$$

G_{ij} (respectivement B_{ij}) étant la conductance (respectivement la susceptance) de transfert entre le nœud i et le nœud j .

Les courants et les *f.e.m* transitoire satisferont les relations suivantes :

$$\bar{i}_R = P \bar{i}_r \quad (\text{II.110})$$

$$\bar{e}_R' = P \bar{e}_r' \quad (\text{II.111})$$

Où P est la matrice de passage de la forme suivante :

$$\bar{P}_{ii} = \exp(j\delta_i); \quad \bar{P}_{ij} = 0 \quad \forall i, j = 1, \dots, n \quad (\text{II.112})$$

A partir de (II.110) et (II.111), nous pouvons écrire :

$$\bar{i}_r = M \bar{e}_r \quad (\text{II.113})$$

M est la matrice donnée par :

$$M = P^{-1} y_{re} P \quad (\text{II.114})$$

Ses éléments sont donnés par :

$$\bar{m}_{ii} = G_{ii} + j B_{ii} \quad (\text{II.115})$$

$$m_{ij} = F_{G+B}(\delta_{ij}) + j F_{G-B}(\delta_{ij}) \quad \forall i, j = 1, \dots, n \quad (\text{II.116})$$

$$F_{G+B}(\delta_{ij}) = G_{ij} \cos(\delta_{ij}) - B_{ij} \sin(\delta_{ij}) \quad (\text{II.117})$$

$$F_{G-B}(\delta_{ij}) = B_{ij} \cos(\delta_{ij}) - G_{ij} \sin(\delta_{ij}) \quad (\text{II.118})$$

Considérons l'équation (II.111), nous avons pour une machine i la relation suivante :

$$\bar{i}_{ri} = \sum_{j=1}^n \bar{m}_{ij} \bar{e}_{ri} \quad \forall i, j = 1, \dots, n \quad (\text{II.119})$$

Comme : $\bar{i}_{ri} = i_{qi} + j i_{di}$

$$\bar{e}_{ri} = e'_{qi} + j e'_{di} \quad (\text{II.120})$$

Les composantes directes et transversales des courants s'écrivent alors sous la forme :

$$i_{di} = G_{ii} e'_{di} + B_{ii} e'_{qi} + \sum_{j=1(\neq i)}^n (e'_{di} F_{G+B}(\delta_{ij}) + e'_{qi} F_{G-B}(\delta_{ij})) \quad (\text{II.121})$$

$$i_{qi} = G_{ii} e'_{qi} + B_{ii} e'_{di} + \sum_{j=1(\neq i)}^n (e'_{qi} F_{G-B}(\delta_{ij}) + e'_{di} F_{G+B}(\delta_{ij})) \quad (\text{II.122})$$

Les composantes directes et transversales des tensions aux bornes de la machine sont obtenues à partir de (II.78) et (II.80) que nous rappelons :

$$v_{di} = e'_{di} - x'_{qi} i_{qi} \quad (\text{II.123})$$

$$v_{qi} = e'_{qi} - x'_{di} i_{di} \quad (\text{II.124})$$

Le module de la tension est alors :

$$v_i = \sqrt{v_{di}^2 + v_{qi}^2} \quad (\text{II.125})$$

La puissance électrique développée par la machine i est donnée par (II.92) que nous rappelons :

$$P_{ei} = e'_{di} i_{di} + e'_{qi} i_{qi} + (x'_{di} - x'_{qi}) i_{di} i_{qi} \quad (\text{II.126})$$

Dans notre étude on s'intéresse uniquement aux machines à pôles lisse. La saillance des pôles est négligée, c'est-à-dire que :

$$x'_{di} = x'_{qi} \quad \forall i, j=1, \dots, n \quad (\text{II.127})$$

La puissance électrique s'écrit donc sous la forme suivante :

$$P_{ei} = G_{ii} (e'_{di}{}^2 + e'_{qi}{}^2) + \sum_{j=1(\neq i)}^n (C_{ij} F_{G+B}(\delta_{ij}) - D_{ij} F_{G-B}(\delta_{ij})) \quad (\text{II.128})$$

avec :

$$C_{ij} = e'_{di} e'_{dj} + e'_{qi} e'_{qj} \quad (\text{II.129})$$

$$D_{ij} = e'_{di} e'_{qj} - e'_{qi} e'_{dj} \quad (\text{II.130})$$

II.9 Modélisation du réseau dans l'espace d'état

Lorsqu'on considère la représentation suivant les deux axes avec les régulations de tension et de vitesse, les équations dynamiques du système pour une machine i , sont les suivantes :

Equations dynamiques électriques :

$$\frac{de'_{di}}{dt} = \frac{1}{T_{q0i}} \left(-e'_{di} + (x'_{qi} - x_{qi}) i_{qi} \right) \quad (\text{II.131})$$

$$\frac{de'_{qi}}{dt} = \frac{1}{T_{d0i}} \left(-e'_{qi} + e_{exi} - (x'_{di} - x_{di}) i_{di} \right) \quad (\text{II.132})$$

Equations dynamiques mécaniques :

$$\frac{d\delta_i}{dt} = \omega_i \quad (\text{II.133})$$

$$\frac{d\omega_i}{dt} = \frac{1}{M_i} (p_{mi} - p_{ei}) \quad (\text{II.134})$$

Régulateur de vitesse :

$$\frac{dp_{mi}}{dt} = \frac{1}{T_{mi}} \left(-p_{mi} + p_{mrefi} - K_{vi} \left(\omega_i - \sigma_i \frac{d\omega_i}{dt} \right) \right) \quad (\text{II.135})$$

$$p_{mi} = P_{mma_i} \quad \text{pour:} \quad p_{mi} \geq P_{mma_i}$$

$$p_{mi} = P_{mmi_i} \quad \text{pour:} \quad p_{mi} \geq P_{mmi_i}$$

Régulateur de tension :

$$\frac{de_{exi}}{dt} = \frac{1}{T_{ei}} \left(-e_{exi} + e_{ex0i} + K_{vi} (v_{refi} - v_i) \right) \quad (II.136)$$

$$e_{exi} = Exma_i \quad \text{pour:} \quad e_{exi} \geq Exma_i$$

$$e_{exi} = Exmi_i \quad \text{pour:} \quad e_{exi} \leq Exmi_i$$

Soit $\underline{x}^s$, un point d'équilibre stable :

$$\underline{x}^s = (e_{d1}^s, \dots, e_{dn}^s, e_{q1}^s, \dots, e_{qn}^s, e_{ex01}^s, \dots, e_{ex0n}^s, p_{mref1}, \dots, p_{mrefn}, \delta_1^s, \dots, \delta_n^s, \omega_1^s = 0, \dots, \omega_n^s = 0) \quad (II.137)$$

Nous définissons les variables d'état du système en prenant comme origine ce point d'équilibre. Elles s'écrivent alors pour chaque machine i comme suit :

$$x_i = \delta_i - \delta_i^s \quad (II.138)$$

$$x_{i+n} = \omega_i \quad (II.139)$$

$$x_{i+2n} = e_{di}' - e_{di}^s \quad (II.140)$$

$$x_{i+3n} = e_{qi}' - e_{qi}^s \quad (II.141)$$

$$x_{i+4n} = p_{mi} - p_{mrefi} \quad (II.142)$$

$$x_{i+5n} = e_{exi} - e_{ex0i} \quad (II.143)$$

Le vecteur des variables d'état est alors le suivant :

$$\underline{x} = (x_i, x_{i+n}, x_{i+2n}, x_{i+3n}, x_{i+4n}, x_{i+5n}) \quad i = 1, \dots, n \quad (II.144)$$

Les équations dynamiques du modèle dans l'espace d'état sont définies par :

$$\dot{x}_i = x_{i+n} \quad (II.145)$$

$$\dot{x}_{i+n} = \frac{1}{M_i} \left(x_{i+4n} + p_{mrefi} - p_{ei}(\underline{x}) \right) \quad (II.146)$$

$$\dot{x}_{i+2n} = \frac{1}{T_{q0i}'} \left(-x_{i+2n} - e_{di}^s + (x_{qi}' - x_{qi}) i_{qi}(\underline{x}) \right) \quad (II.147)$$

$$\dot{x}_{i+3n} = \frac{1}{T_{d0i}'} \left(-x_{i+3n} + x_{i+5n} + e_{ex0i} - e_{qi}^s - (x_{di}' - x_{di}) i_{di}(\underline{x}) \right) \quad (II.148)$$

$$\dot{x}_{i+4n} = \frac{1}{T_{mi}} \left(-K_{vi} x_{i+n} - \left(1 + \frac{K_{vi} \sigma_i}{M_i} \right) x_{i+4n} - \frac{K_{vi} \sigma_i}{M_i} p_{mrefi} + \frac{K_{vi} \sigma_i}{M_i} p_{ei}(\underline{x}) \right) \quad (II.149)$$

$$\dot{x}_{i+5n} = \frac{1}{T_{ei}} \left(-x_{i+5n} + K_{ei} \left[v_{refi} - v_i(\underline{x}) \right] \right) \quad (II.150)$$

Les équations d'interconnexion en fonction des variables d'état sont données par :

$$i_{di}(\underline{x}) = G_{ii} x_{i+2n} + B_{ii} x_{i+3n} + G_{ii} e_{di}^s + B_{ii} e_{qi}^s + \sum_{j=1(\neq i)}^n K_{ij} (x_{j+3n} \cos \phi_{ij} + x_{j+2n} \sin \phi_{ij} + e_{qj}^s \cos \phi_{ij} + e_{dj}^s \sin \phi_{ij}) \quad (\text{II.151})$$

$$i_{qi}(\underline{x}) = G_{ii} x_{i+3n} + B_{ii} x_{i+2n} + G_{ii} e_{qi}^s + B_{ii} e_{di}^s + \sum_{j=1(\neq i)}^n K_{ij} (x_{j+3n} \sin \phi_{ij} - x_{j+2n} \cos \phi_{ij} + e_{qj}^s \sin \phi_{ij} - e_{dj}^s \cos \phi_{ij}) \quad (\text{II.152})$$

$$v_{di}(\underline{x}) = -x_{qi}' G_{ii} x_{i+3n} + (1 + x_{qi}' B_{ii}) x_{i+2n} - x_{qi}' G_{ii} e_{qi}^s + (1 + x_{qi}' B_{ii}) e_{di}^s + \sum_{j=1(\neq i)}^n K_{ij} x_{qi}' \xi_j \cos(\phi_{ij} + \gamma_j) - \sum_{j=1(\neq i)}^n K_{ij} x_{qi}' (x_{j+3n} \sin \phi_{ij} - x_{j+2n} \cos \phi_{ij}) \quad (\text{II.513})$$

$$v_{qi}(\underline{x}) = x_{di}' G_{ii} x_{i+2n} + (1 + x_{di}' B_{ii}) x_{i+3n} + x_{di}' G_{ii} e_{di}^s + (1 + x_{di}' B_{ii}) e_{qi}^s + \sum_{j=1(\neq i)}^n K_{ij} x_{di}' \xi_j \cos(\phi_{ij} + \gamma_j) + \sum_{j=1(\neq i)}^n K_{ij} x_{di}' (x_{j+3n} \cos \phi_{ij} + x_{j+2n} \sin \phi_{ij}) \quad (\text{II.154})$$

$$v_i(\underline{x}) = \sqrt{x_{di}^2(\underline{x}) + x_{qi}^2(\underline{x})} \quad (\text{II.155})$$

$$p_{ei}(\underline{x}) = G_{ii} \left((x_{i+2n} + e_{di}^s)^2 + (x_{i+3n} + e_{qi}^s)^2 \right) + \sum_{j=1(\neq i)}^n K_{ij} \{ (x_{j+2n} + e_{dj}^s)(x_{i+2n} + e_{di}^s) + (x_{j+3n} + e_{qj}^s)(x_{i+3n} + e_{qi}^s) \} \sin \phi_{ij} + \sum_{j=1(\neq i)}^n K_{ij} \{ (x_{j+3n} + e_{qj}^s)(x_{i+2n} + e_{di}^s) - (x_{j+2n} + e_{dj}^s)(x_{i+3n} + e_{qi}^s) \} \cos \phi_{ij} \quad (\text{II.156})$$

avec :

$$K_{ij} = \sqrt{G_{ij}^2 + B_{ij}^2}$$

$$\beta_{ij} = \text{Arctg} \frac{G_{ij}}{B_{ij}}$$

$$\phi_{ij} = x_{ij} + \delta_{ij}^s + \beta_{ij}$$

$$\xi_j = \sqrt{e_{qj}^s{}^2 + B_{dj}^s{}^2}$$

$$\gamma_j = \text{Arctg} \frac{e_{qj}^s}{e_{dj}^s}$$

II.10 Evaluation de la stabilité transitoire

La procédure d'évaluation de la stabilité transitoire, consiste à suivre les étapes suivantes [8] :

1. La première étape dans les études de la stabilité transitoire est le calcul d'écoulement de puissance, afin d'obtenir les conditions initiales du réseau juste avant la perturbation. Une fois les données du réseau introduites, on calcule la matrice admittance du système avant défaut. Après le choix du nœud de référence (généralement, le nœud possédant le moment d'inertie le plus important), une solution initiale est proposée et l'équation de performance du système (II.5) est résolue. La méthode de **Gauss-Seidel** a été utilisée pour le calcul d'écoulement de puissance.
2. Introduction des données relatives au problème de la stabilité transitoire :
 - Constantes d'inertie des groupes H_i .
 - Réactances synchrones et transitoires directes et transversales des générateurs ;
 - Données des régulateurs de tension.
 - Données des régulateurs de vitesse.
 - Nature et endroit du défaut (court circuit triphasé, perte d'une ligne, perte d'une charge)
 - Temps d'élimination du défaut (t_e).
3. Calculs préliminaires à effectuer :
 - Conversion des charges en admittances équivalentes.
 - Calcul des matrices admittances du réseau pendant et après la perturbation ainsi que des matrices admittances réduites du système. Ainsi, tous les paramètres des équations différentielles données par (II.145) à (II.150) et les équations d'interconnexion par (II.151) à (II.156), sont déterminés.
4. Résolution du système d'équations différentielles non linéaires donné par (II.145) à (II.149) afin d'obtenir l'évolution dans le temps des angles et vitesses des générateurs. Les conditions initiales sont déterminées à partir des résultats d'écoulement de puissance.

Les équations données par (II.145) (II.146) (II.147) (II.148) (II.149) et (II.150) représentent le modèle du système pendant le défaut et après élimination du défaut. Seuls les coefficients des équations d'interconnexion changent suivant la topologie du système.

Plusieurs méthodes sont proposées dans la littérature pour la résolution des équations différentielles. Dans cette étude, on utilise la méthode d'intégration numérique basée sur la méthode d'**Eleur modifiée** [8] pour le réseau IEEE 3 machines 9 nœuds.

5. Pour des temps d'élimination de défauts successifs t_e , on intègre le système pendant et après l'élimination du défaut. A chaque fois, nous analysons les courbes des angles rotoriques. Si tous les angles rotoriques, mesurés par rapport au centre d'angle du système, atteignent un maximum et diminuent par la suite, alors le système est stable pour le t_e choisi.

Si l'un des angles continue à augmenter dans le temps, alors le générateur correspondant va perdre le synchronisme et le système est instable. Après plusieurs simulations, le temps critique d'élimination du défaut CCT est déterminé.

L'algorithme résumant cette procédure est donné par la figure II.9.

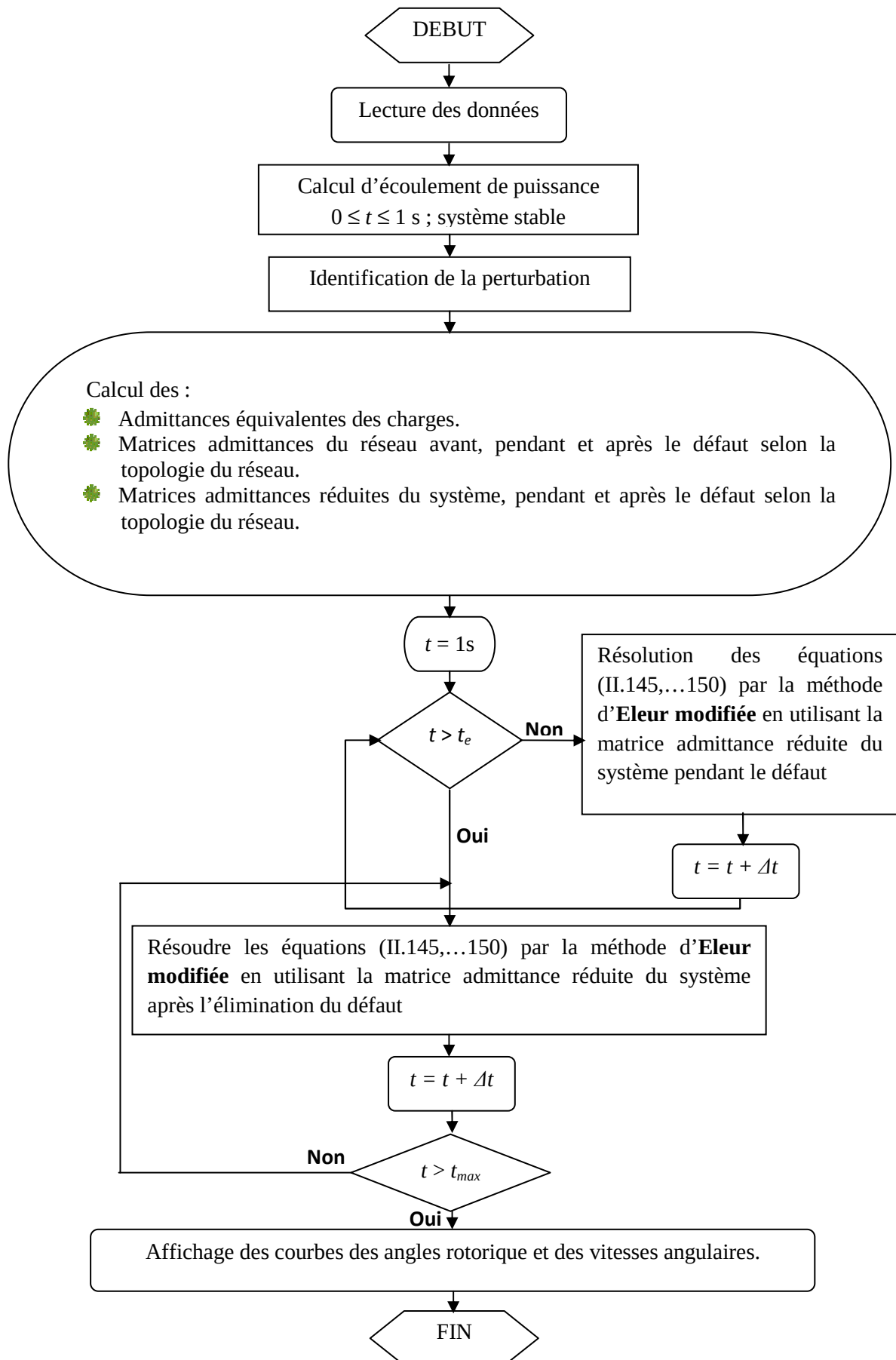


Figure II.9 : Algorithme d'évaluation de la stabilité transitoire

II.11 Résultats et interprétations

Le système d'application choisi pour tester les programmes élaborés est le réseau IEEE 3 machines 9 nœuds. Il est constitué de 3 générateurs, 3 charges et 3 compensateurs. La topologie du système et les données des différents éléments se trouvent en annexe I.

Les principaux résultats obtenus sous environnement MATLAB sont présentés. Le défaut considéré est un court circuit triphasé à la terre localisé dans le nœud 2, et cela pendant un temps pour l'élimination de défaut t_e . Le défaut est modélisé en ajoutant une admittance très grande entre le nœud de défaut et la terre.

II.11.a Résultats de l'écoulement de charge

La matrice admittance d'interconnexion du réseau utilisée pour le calcul d'écoulement de charge est donnée par le tableau (II.1).

Tableau II.1 Matrice admittance Y du réseau IEEE 3 machines 9 nœuds (pu)

0.68 - 78.53i	-0.68 + 12.31i	0	0.00 + 66.23i	0	0	0	0	0
	1.25 - 94.44i	-0.56 + 10.72i	0	0.00 + 71.43i	0	0	0	0
		0.56 - 57.67i	0	0	0.00 + 46.95i	0	0	0
			01.66 - 109.29i	0	0	-1.06+ 24.23i	-0.60 + 18.85i	0
				05.77 - 148.62i	0	0	-3.20 + 44.61i	-2.56 + 32.59i
					13.54 - 164.66i	-1.87 + 33.12i	0	-11.67+ 84.60i
						5.57 - 92.75i	-1.20 + 16.30i	-1.43 + 19.12i
							5.92 - 93.39i	-0.92 + 13.64i
								16.58 - 149.93i

Le programme d'écoulement de charge par la méthode de Gauss-Seidel converge en 13 itérations avec une précision de 10^{-3} . Les résultats principaux sont donnés par le tableau (II.2).

Tableau II.2 Résultats d'écoulement de charge

N° Nœud	Tension		Charge		Génération	
	Amplitude (pu)	Angle (°)	Active (pu)	Réactive (pu)	Active (pu)	Réactive (pu)
1	1.004	0	0	0	0.66	0.32
2	1.002	0.65	0	0	1.63	0.24
3	1.002	0.10	0	0	0.85	0.28
4	1	-0.68	0	0	0	0
5	0.998	-0.47	0	0	0	0
6	0.996	-1.06	0	0	0	0
7	0.992	-1.86	- 1.21	- 0.35	0	0
8	0.993	-1.56	- 1.11	-0.25	0	0
9	0.994	-1.38	- 0.81	- 0.20	0	0

II.11.b Résultats de la stabilité transitoire

Plusieurs perturbations sont simulées pour valider le programme élaboré. Nous présentons à titre d'exemple les résultats concernant un défaut de court circuit triphasé au niveau de la ligne 2-3 (branche 3) proche du nœud 2.

II.11.b.1. Matrices admittances du réseau

Les matrices admittances du réseau qui tiennent compte des charges nominales et des réactances transitoires des générateurs et celles réduites aux nœuds machines (avant, durant et après perturbation) sont données par les tableaux II.3 jusqu'à II.8.

Tableau II.3 Matrice admittance avant défaut (pu)

+0.00 -5.08i	0	0	+0.00 +5.08i	0	0	0	0	0	0	0	0
	+0.00 -5.08i	0	0	+0.00 +5.08i	0	0	0	0	0	0	0
		+0.00 -4.00i	0	0	+0.00 +4.00i	0	0	0	0	0	0
			+0.68 -83.61i	-0.68 +12.31i	0	+0.00 +66.23i	0	0	0	0	0
				+1.25 - 99.53i	-0.56 +10.72i	0	+0.00 +71.43i	0	0	0	0
					+0.56 - 61.67i	0	0	+0.00 +46.95i	0	0	0
						+1.66 - 109.29i	0	0	-1.06 +24.23i	-0.60 +18.85i	0
							+5.77 - 148.62i	0	0	-3.20 +44.61i	-2.56 +32.59i
								+13.54 - 164.66i	-1.87 +33.12i	0	-11.67 +84.60i
									+6.80 - 93.11i	-1.20 +16.30i	-1.43 +19.12i
										+7.05 - 93.64i	-0.92 +13.64i
											+17.41 - 150.13i

Tableau II.4 Matrice admittance réduite avant défaut (pu)

+0.34 -3.09i	+0.33 +1.51i	+0.26 +1.12i
	+0.36 -3.21i	+0.27 +1.22i
		+0.23 -2.72i

Tableau II.5 Matrice admittance durant le défaut (pu)

+0.00 -5.08i	0	0	+0.00 +5.08i	0	0	0	0	0	0	0	0
	+0.00 -5.08i	0	0	+0.00 +5.08i	0	0	0	0	0	0	0
		+0.00 -4.00i	0	0	+0.00 +4.00i	0	0	0	0	0	0
			+0.68 - 83.61i	-0.68 +12.31i	0	+0.00 +66.23i	0	0	0	0	0
				+10001.25- 10099.53i	-0.56 +10.72i	0	+0.00 +71.43i	0	0	0	0
					+0.56 - 61.67i	0	0	+0.00 +46.95i	0	0	0
						+1.66 - 109.29i	0	0	-1.06 +24.23i	-0.60 +18.85i	0
							+5.77 - 148.62i	0	0	-3.20 +44.61i	-2.56 +32.59i
								+13.54 - 164.66i	-1.87 +33.12i	0	-11.67 +84.60i
									+6.80 - 93.11i	-1.20 +16.30i	-1.43 +19.12i
										+7.05 - 93.64i	-0.92 +13.64i
											+17.41 - 150.13i

Tableau II.6 Matrice admittance réduite durant le défaut (pu)

+0.04 -4.30i	0	+0.02 +0.14i
	+0.00 -5.08i	0
		+0.03 -3.51i

Tableau II.7 Matrice admittance après élimination du défaut (pu)

+0.00 -5.08i	0	0	+0.00 +5.08i	0	0	0	0	0	0	0	0
	+0.00 -5.08i	0	0	+0.00 +5.08i	0	0	0	0	0	0	0
		+0.00 -4.00i	0	0	+0.00 +4.00i	0	0	0	0	0	0
			+0.68 - 83.61i	-0.68 +12.31i	0	+0.00 +66.23i	0	0	0	0	0
				+1.25 - 99.53i	-0.56 +10.72i	0	+0.00 +71.43i	0	0	0	0
					+0.56 - 61.67i	0	0	+0.00 +46.95i	0	0	0
						+1.66 - 109.29i	0	0	-1.06 +24.23i	-0.60 +18.85i	0
							+5.77 - 148.62i	0	0	-3.20 +44.61i	-2.56 +32.59i
								+13.54 -164.66i	-1.87 +33.12i	0	-11.67 +84.60i
									+6.80 - 93.11i	-1.20 +16.30i	-1.43 +19.12i
										+7.05 - 93.64i	-0.92 +13.64i
											+17.41 -150.13i

Tableau II.8 Matrice admittance réduite après élimination du défaut (pu)

+0.34 -3.09i	+0.33 +1.51i	+0.26 +1.12i
	+0.36 -3.21i	+0.27 +1.22i
		+0.23 -2.72i

II.11.b.2 Caractéristiques des angles rotoriques

Les angles rotoriques δ_i sont représentés par rapport à une machine de référence tournant au synchronisme. Cette référence est le centre d'inertie des machines COA (Center Of Angle) qui permet d'avoir des courbes compactes et symétriques.

La référence du centre d'inertie est définie comme suit :

$$\delta_{COA} = \frac{\sum_{i=1}^n M_i \delta_i}{\sum_{i=1}^n M_i} \quad (II.157)$$

Les figures II.10.a et II.10.b représentent l'évolution des angles rotoriques internes des machines avant, pendant et après l'élimination du défaut. On remarque pour un défaut qui dure 0.28 s, le système est déclaré stable, tandisque pour un temps de 0.3 s le système est instable.

- Défaut éliminé après 0.28 s (système stable) -

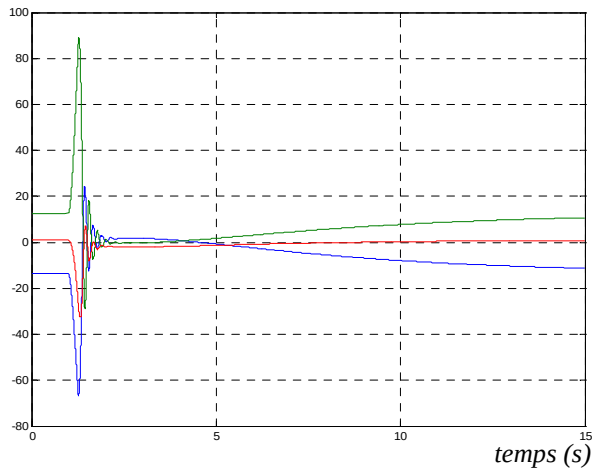


Figure II.10-a : Angle rotorique en degré
(Réf COA)

- Défaut éliminé après 0.3 s (système instable) -

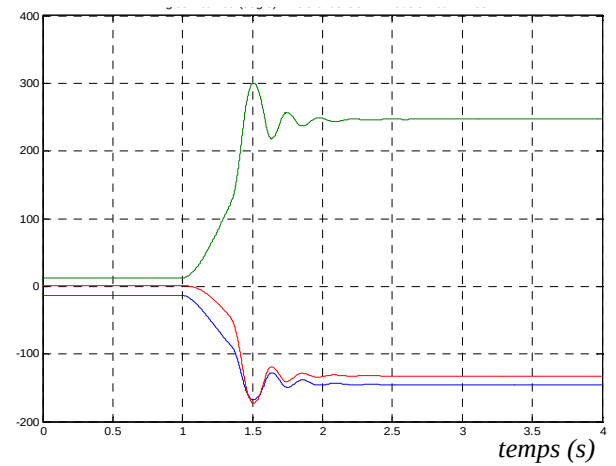


Figure II.10-b : Angle rotorique en degré
(Réf COA)

II.11.b.3 Caractéristiques des tensions

Les figures II.11.a et II.11.b illustrées ci-dessous représentent l'évolution des tensions aux nœuds machines et cela au cours de la phase d'équilibre - avant perturbation (1s), phase transitoire - pendant la perturbation (t_e) et la nouvelle phase d'équilibre - après l'élimination du défaut.

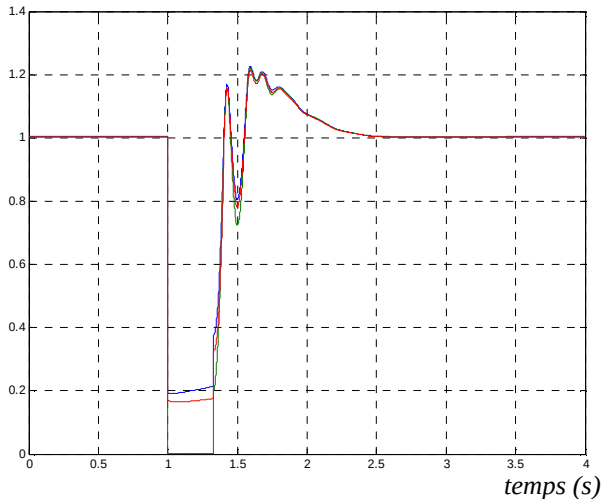


Figure II.11-a : Tensions aux nœuds machines

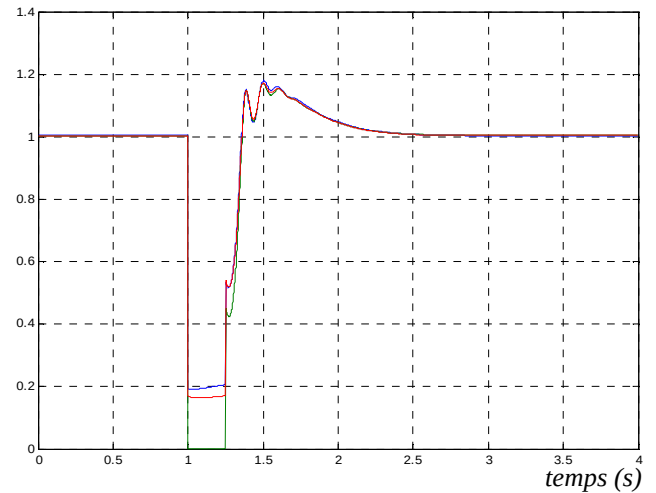


Figure II.11-b : Tensions aux nœuds machines

II.12 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons traité le problème de l'évaluation de la stabilité transitoire par la méthode classique d'intégration numérique. Cette dernière évalue la robustesse du réseau vis-à-vis des grandes perturbations en déterminant son évolution temporelle par résolution pas à pas de l'ensemble des équations intégral-différentielles non linéaires qui régissent le système.

En outre, l'application de cette méthode nécessite un temps de calcul énorme, ce qui en fait un obstacle pour l'application de cette méthode en temps réel, et pourtant, elle reste la référence et l'outil de base de toute analyse de la stabilité transitoire.

Pour palier les insuffisances de cette méthode, les réseaux de neurones artificiels seront utilisés dans le chapitre suivant pour une évaluation rapide de la stabilité transitoire.

Chapitre III

Évaluation de la Stabilité Transitoire des RÉE par RNA

III.1 Introduction

Une approche complètement différente pour accomplir des simulations rapides de la stabilité transitoire a été introduite, elle est basée sur la technologie des réseaux neuronaux artificiels RNA qui trouve ses origines dans certaines propriétés des neurones biologiques. Ils comprennent une variété d'architectures d'éléments de processus fortement interconnectés qui offrent une alternative aux approches conventionnelles de calcul. En effet ils offrent la possibilité de produire des calculs très complexes là où les systèmes classiques trouvent des difficultés à les exécutés [8, 15].

À cause de leurs capacités à représenter n'importe qu'elle fonction, linéaire ou non-linéaire, simple ou complexe, leurs puissances et leurs pouvoirs de généralisation ont fait d'eux des outils que n'ont été concurrencés par aucune technique nouvellement apparue. Dans les dernières années, les RNA connaissent un succès croissant dans divers domaines d'analyse des réseaux électriques et des systèmes d'asservissement. Ceci inclut les prévisions de charge, l'évaluation de la sécurité statique, dynamique, la modélisation des charges dynamiques, les diagnostics des défauts et les processus d'alarme, en plus des démonstrations significatives des capacités des RNA dans la modélisation et l'identification des systèmes.

Dans ce chapitre, la première partie est consacrée à un aperçu de cette technique à travers une présentation générale du réseau de neurones artificiels. La seconde partie, traite la construction d'un réseau de neurones, qui aura pour but d'évaluation des temps critiques de stabilité transitoire du réseau électrique étudié.

III.2 Réseaux de neurones artificiels

III.2.a Fondement Biologique

Les neurones biologiques sont des cellules vivantes spécialisées dans le traitement des signaux. Ils sont reliés entre eux par des liaisons appelées axones jouant un rôle important dans le comportement logique de l'ensemble. Ils conduisent les signaux électriques de la sortie d'un neurone vers l'entrée d'un autre neurone [29, 30].

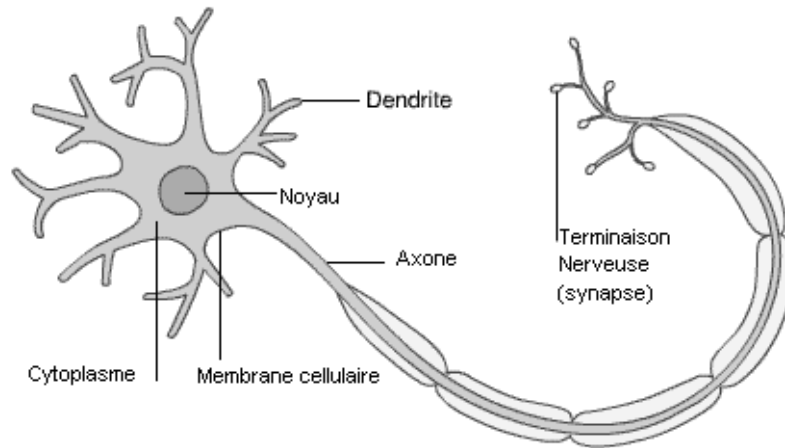


Figure III.1 : Neurone biologique.

La structure d'un neurone biologique, comme montré dans la Figure III.1, se compose de trois parties :

1. **La somma** : ou cellule d'activité nerveuse, au centre du neurone.
2. **L'axone** : attaché au somma qui est électriquement actif, ce dernier conduit l'impulsion conduite par le neurone.
3. **Dendrites** : électriquement passives, elles reçoivent les impulsions d'autres neurones.

III.2.b Le Neurone Formel (Artificiel)

Le neurone formel représente la brique de base des RNA, c'est un automate dont le modèle s'inspire de celui d'un neurone biologique. Les premiers travaux datent de 1943 par MM. Mac Culloch et Pitts. Ils présentent un modèle assez simple pour le neurone et explorent les possibilités de ce modèle pour concevoir tous les réseaux de neurones [29].

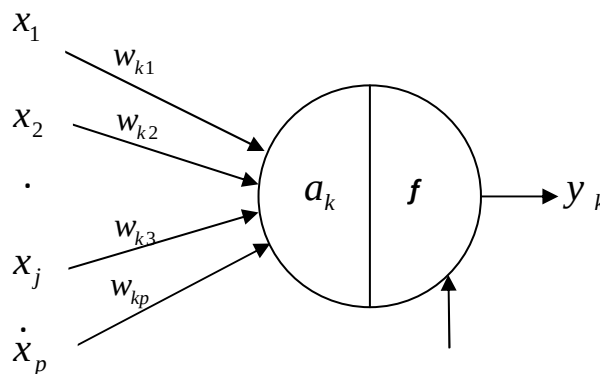
Cette modélisation consiste à mettre en œuvre le système sous un aspect non pas biologique mais artificiel, cela suppose que d'après le principe biologique qu'on aura une correspondance pour chaque élément composant le neurone biologique, donc une modélisation pour chacun d'entre eux [29, 30, 31].

On pourra résumer cette modélisation par le tableau ci-dessous (tableau III.1), qui nous permettra de voir clairement la transition entre le neurone biologique et le neurone formel.

Tableau III.1 Transition entre le neurone biologique et le neurone formel

Neurone biologique	Neurone artificiel
Synapse	Poids de connexion
Axone	Signal d'entrée
Dendrite	Signal de sortie
Somma	Fonction d'activation

Le neurone artificiel, montré par la figure III.2, est un processeur élémentaire. Il reçoit un nombre variable d'entrées en provenance de neurones appartenant à un niveau situé en amont. A chacune de ses entrées est associé un poids w représentatif de la force de la connexion. Chaque processeur élémentaire est doté d'une sortie unique, qui se ramifie ensuite pour alimenter un nombre variable de neurones appartenant à un niveau situé en aval. Chaque connexion est associée par un poids.

**Figure III.2** : Modèle d'un neurone formel

x_j ($j=1\dots p$) : Les entrées du $k^{ème}$ neurone.

w_{ki} : Les poids synaptiques ou tout simplement poids.

a_k : L'activation du $k^{ème}$ neurone.

$f(.)$: La fonction d'activation.

y_k : La sortie du $k^{ème}$ neurone.

La fonction d'activation permet de définir l'état interne du neurone en fonction de son entrée totale. Différentes fonctions de transfert pouvant être utilisées comme fonctions d'activation du neurone dont on distingue deux types, les fonctions unipolaires et celles bipolaires.

III.2.c Réseau de neurones

Un réseau de neurones est un maillage de plusieurs neurones, généralement organisé en couches. Pour concevoir un réseau de neurones il faut suivre une certaine topologie. La topologie d'un réseau de neurone est définie par son architecture et la nature de ses connexions.

III.2.c.1 Architecture du réseau de neurones

L'architecture d'un réseau de neurones est fonction du nombre de couches de ce dernier et surtout de la structure des connexions entre neurones. Il existe plusieurs types d'architectures, on peut citer :

- réseaux mono couche,
- réseaux multicouches,
- réseaux à connexions locales,
- réseaux à connexions complètes.

Dans notre étude, le type du réseau qui nous intéresse est le réseau multicouche.

III.2.c.2 Connexions du réseau de neurones

La nature des connexions définit la manière dont sont interconnectés les neurones et le sens de transfert d'information dans le réseau, où on distingue :

- Les Connexions Directes, celles dirigées d'une couche d'indice inférieur vers une couche d'indice supérieur (figure III.3-a).
- Les Connexions Récurrentes dont les sorties de neurones d'une couche sont connectées aux entrées d'une couche d'indice inférieur (figure III.3-b).

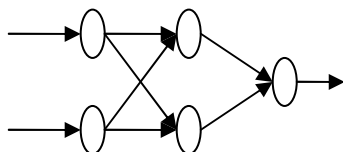


Figure III.3-a : Connexions directes

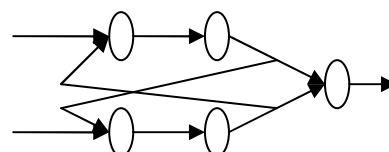


Figure III.3-b : Connexions récurrentes

Par ailleurs entre deux couches, les connexions peuvent être partielles ou totales comme le montre les figures III.4-a et III.4-b. L'utilisation de connexions partielles permet de regrouper certaines zones du réseau pour effectuer une fonction spécifique.

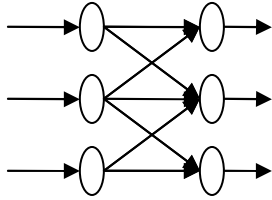


Figure III.4-a : Connexions partielles

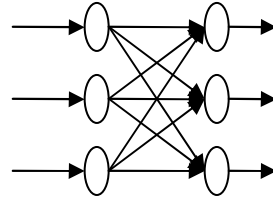


Figure III.4-b : Connexions totales

On peut avoir éventuellement en plus des connexions citées précédemment des connexions inter-couches (interconnexions entre neurones de couches voisines), des connexions intra-couches (connexions entre neurones d'une même couche) et l'auto-connexion (un neurone avec lui même).

III.2.d Réseaux de neurones multicouches

Un réseau multicouche n'est rien d'autre qu'un assemblage de couches les unes aux autres, de la gauche vers la droite, en prenant les sorties d'une couche et en les injectant comme les entrées de la couche suivante. Ce type de réseau comme le montre la figure III.5, est organisé en couches de neurones. Généralement, il n'y a pas de connexions entre neurones d'une même couche, et les connexions ne se font qu'avec ceux des couches en aval.

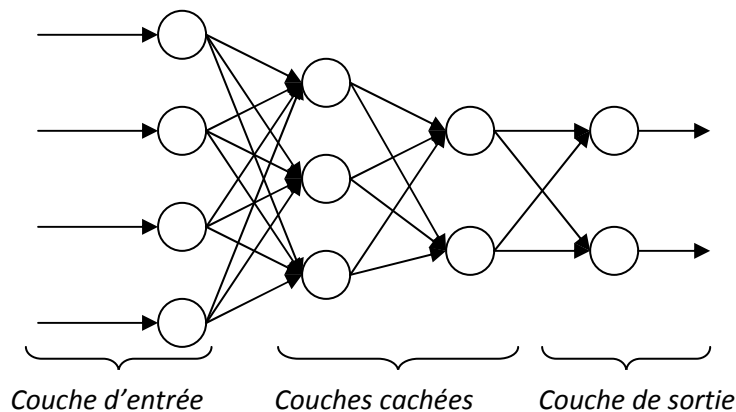


Figure III.5 : Réseau de neurones multicouches

III.2.e Apprentissage des réseaux de neurones

La plus fondamentale des propriétés propres au réseau de neurones est sa capacité d'apprendre de son environnement et d'améliorer sa performance à travers un processus d'apprentissage. On définit l'apprentissage comme étant un changement opéré dans la mémoire du réseau en affectant les valeurs des poids synaptiques qui relient les neurones entre eux, afin d'adapter le traitement effectué par le réseau à une tâche particulière.

De ce fait l'apprentissage a pour objectif l'amélioration des performances futures du réseau, sur la base d'une connaissance acquise au fur et à mesure des expériences passées. On distingue trois familles d'apprentissage différentes en fonction de la nature des informations disponibles et du but recherché :

- **Apprentissage supervisé** pour lequel il est nécessaire de disposer d'un ensemble de couples de données (entrées du réseau ; sorties désirées correspondantes).
- **Apprentissage semi-supervisé ou par renforcement** pour lequel seule une mesure d'erreur qualitative est disponible.
- **Apprentissage non supervisé** pour lequel il n'y a pas de réponse désirée.

Il a été démontré que moyennant le choix d'une architecture appropriée (nombre de neurones cachés), les réseaux multicouches sont capables d'approcher n'importe quelle fonction. Une autre propriété fondamentale de l'apprentissage concerne la capacité de généralisation de ces réseaux [15, 29].

III.2.f Algorithme d'apprentissage

L'apprentissage se traduit, dans la plupart des architectures, par une modification de l'efficacité synaptique qui s'effectue en changeant les valeurs des poids qui relient les neurones d'une couche à l'autre.

Soit w_{ij} le poids reliant le j^{eme} neurone d'une couche au i^{eme} neurone de la couche suivante. A l'instant t un changement $\Delta w_{ij}(t)$ s'exprime en fonction de $w_{ij}(t+1)$ et $w_{ij}(t)$ qui sont respectivement les nouvelle et ancienne valeurs du poids w_{ij} par l'équation :

$$\Delta w_{ij}(t) = w_{ij}(t+1) - w_{ij}(t) \quad (\text{III.3})$$

L'ensemble de règles permettant la réalisation d'un tel processus d'adaptation des poids constitue ce qu'on appelle l'algorithme d'apprentissage du réseau.

Il existe plusieurs algorithmes d'apprentissage des réseaux de neurones. Dans le cadre de notre travail, on utilise l'algorithme de rétropropagation du gradient le plus couramment utilisé dans les études d'évaluation de la stabilité transitoire.

III.3 Rétropropagation du gradient

De nos jours, les réseaux multicouches et la rétropropagation de gradient reste le modèle le plus étudié et le plus efficace pour réaliser l'adaptation des réseaux multicouches. L'algorithme de rétropropagation (backpropagation) a été développé en particulier par **Rumelhart** et **Parkien** et **le Cun** en 1985. Dès cette découverte, nous avons la possibilité de réaliser une fonction non linéaire d'entrée/sortie sur un réseau en décomposant cette fonction en une suite d'étapes linéairement séparables. Cet algorithme repose sur la minimisation de l'erreur quadratique J entre les sorties calculées (réelle) et celles souhaitées (désirée). Le terme rétropropagation du gradient provient du fait que l'erreur calculée en sortie est transmise en sens inverse vers l'entrée.

$$J = \frac{1}{2} e^2 = \frac{1}{2} (y_d - y)^2 \quad (\text{III.4})$$

e : est l'écart entre la sortie réelle y et la sortie désirée y_d .

La théorie de rétropropagation comporte deux phases :

- Une propagation dans le sens direct des signaux de la couche d'entrée, couche par couche, jusqu'à atteindre la couche de sortie qui délivre les signaux de sortie du réseau.
- Une rétropropagation de l'erreur, qui se propage dans le sens inverse, de la couche de sortie jusqu'à atteindre la couche d'entrée qui sera utilisée pour l'ajustement des paramètres du réseau.

Soit le réseau multicouche de la figure III.6.

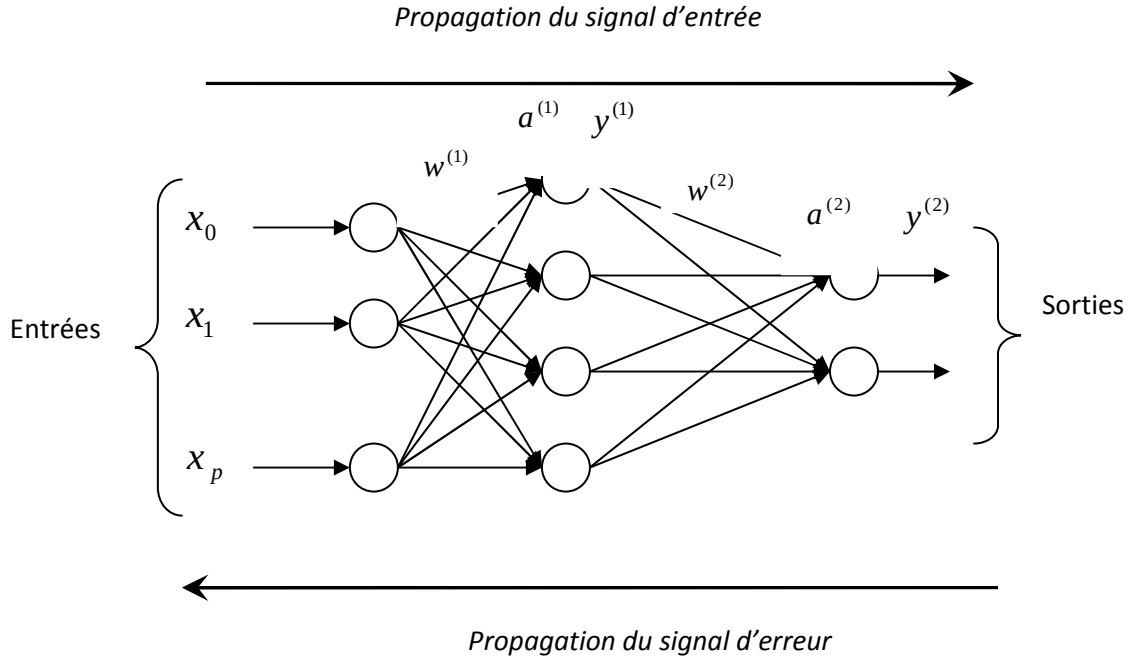


Figure III-6 : Flux des signaux de la rétropropagation

$w^{(L)}$: le vecteur des poids synaptiques d'un neurone appartenant à la couche L ;

$a^{(L)}$: le vecteur activités des neurones de la couche L ;

$y^{(L)}$: le vecteur des sorties de la couche L ;

$f(.)$: la fonction d'activation d'un neurone.

L'algorithme d'apprentissage est donné par les étapes suivantes:

1. Initialiser les poids: attribuer à chaque poids une valeur aléatoire entre -1 et +1.
2. Présenter un exemple au réseau : on présente un exemple x_p en entrée et une valeur désirée en sortie.
3. Propager les signaux d'activation des entrées vers les sorties: on calcule les sorties de la première couche qui deviennent les entrées de la couche suivante puis on fait de même jusqu'à la dernière couche.

L'activité du neurone j de la couche L pendant l'itération n

$$a_j^{(L)}(n) = \sum_{i=0}^p w_{ji}^{(L)}(n) \cdot y_i^{(L-1)}(n) \quad (\text{III.5})$$

w_{ji} : le poids synaptique d'un neurone j appartenant à la couche (L) relié à un neurone i appartenant à la couche ($L-1$).

Les sorties du réseau à la $n^{ème}$ itération sont notées : $o_j(n)=y_j^{(L)}$.

4. Comparer avec les sorties désirées et rétropropager l'erreur des couches de sortie.

Le calcul des gradients :

- Pour un neurone de la couche de sortie :

$$\delta_i(n) = e_i(n) \cdot f'(a_i(n)) \quad (\text{III.6})$$

- Pour un neurone caché :

$$\delta_i(n) = f'(a_i(n)) \cdot \sum_k \delta_k(n) \cdot w_{ki}(n) \quad (\text{III.7})$$

Une des fonctions d'activation la plus utilisée généralement est la fonction sigmoïde définie comme suit:

$$f(x) = \frac{1}{1 + \exp(-x)} \quad (\text{III.8})$$

où :

$$f'(x) = f(x) \cdot [1 - f(x)] \quad (\text{III.9})$$

$$f'(a_j(n)) = f(a_j(n)) \cdot [1 - f(a_j(n))] = y_i(n) \cdot [1 - y_i(n)] \quad (\text{III.10})$$

En utilisant les propriétés de la fonction sigmoïde, les équations (III-6) et (III-7) deviennent :

- Pour un neurone de la couche de sortie :

$$\delta_j(n) = [d_j(n) - o_j(n)] \cdot o_j(n) \cdot [1 - o_j(n)] \quad (\text{III.11})$$

- Pour un neurone caché :

$$\delta_i(n) = o_j(n) \cdot [1 - o_j(n)] \cdot \sum_k \delta_k(n) \cdot w_{ki}(n) \quad (\text{III.12})$$

5. Modifier les poids en appliquant la loi généralisée suivante :

$$\Delta w_{ji}^{(L)}(n+1) = \Delta w_{ji}^{(L)}(n) + \eta \cdot \delta_j^{(L)} \cdot y_i^{(L-1)}(n) \quad (\text{III.13})$$

$\Delta w_{ji}^{(L)}(n+1)$: Le poids synaptique reliant le neurone i de la couche $(L-1)$ au neurone j de la couche (L) à l'itération $n+1$.

$\Delta w_{ji}^{(L)}(n)$: Le poids synaptique reliant le neurone i de la couche $(L-1)$ au neurone j de la couche (L) à l'itération n .

η : Le pas d'apprentissage.

$\delta_j^{(L)}$: Le gradient local du neurone j de la couche (L) .

$y_i^{(L-1)}(n)$: La sortie du neurone i appartenant à la couche $(L-1)$ à l'itération n .

6. Critère d'arrêt : plusieurs critères peuvent être utilisés avec l'algorithme de rétropropagation des erreurs. Le plus commun consiste à fixer un nombre maximum de périodes d'entraînement, ce qui fixe effectivement une limite supérieure sur la durée de l'apprentissage.

Ce critère est important car la rétropropagation des erreurs n'offre aucune garantie quant à la convergence de l'algorithme. Il peut arriver, que le processus d'optimisation reste pris dans un minimum local. Sans un tel critère, l'algorithme représenté par la figure III. 7- pourrait ne jamais se terminer.

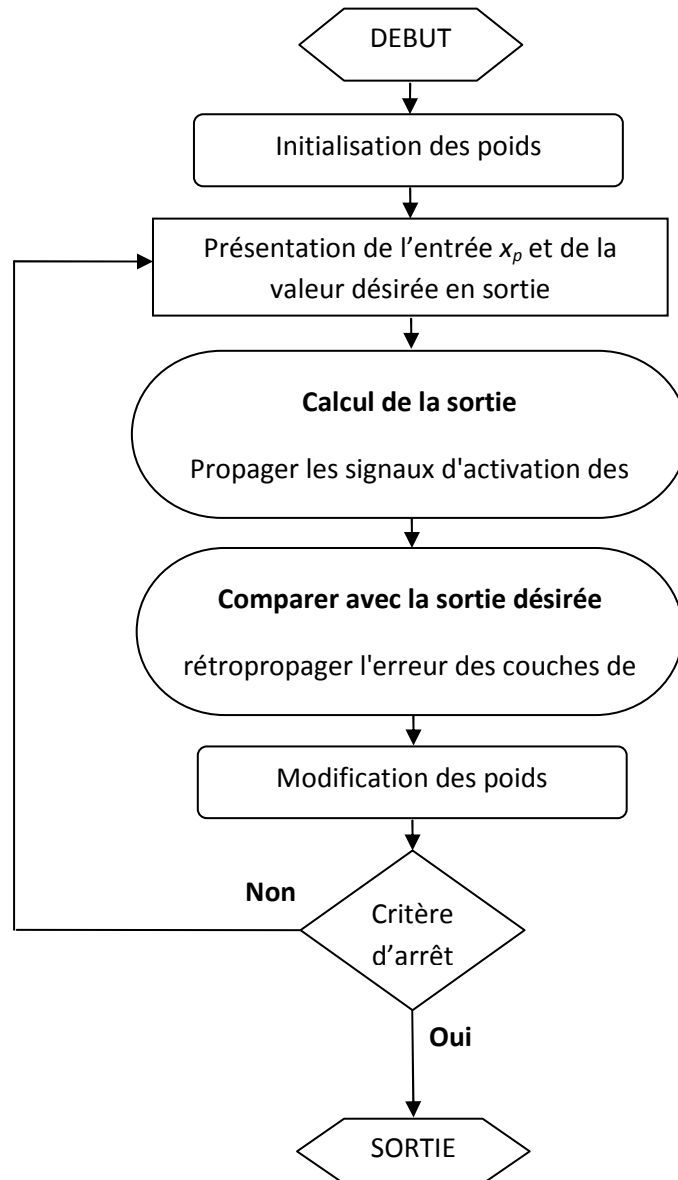


Figure III. 7 : Algorithme de la rétropropagation de l'erreur

III.4 Application des RNA à l'étude de la stabilité transitoire des REE

Une bonne conception d'un réseau de neurones nécessite une base de données réaliste reflétant les comportements du réseau électrique. Elle doit apporter la meilleure représentation possible du système étudié, afin de permettre aux réseaux de neurones de bien s'adapter à son application. Dans les références [32, 33, 34, 35, 36, 37, 38], plusieurs travaux traitant des applications des réseaux de neurones sont succinctement décrits suivant leurs domaines d'application : analyse de la stabilité transitoire, identification, modélisation et prédiction, contrôle, délestage de charge, détection des défauts et évaluation de la sécurité.

III.4.1 Création de l'ensemble d'apprentissage

Le vecteur d'entrée généré pour l'apprentissage du modèle est constitué de l'ensemble des nœuds de génération n_g (où n_g est le nombre de générateurs). Les paramètres des générateurs de 1 jusqu'à n_g sont définis comme suit :

- ◇ les angles internes δ_g des rotors de chaque générateur en degré ;
- ◇ les tensions V_i de chaque générateur en pu ;
- ◇ les puissances d'accélération de chaque générateur en pu ;

Nous utiliserons cette approche pour évaluer la stabilité transitoire du réseau IEEE-3-Machines-9-Nœuds, dont les principales données sont fournies en annexe.

Dans ce travail, notre but est d'évaluer les capacités générales du réseau de neurones, et de traiter et examiner une large gamme de données afin de générer l'ensemble d'apprentissage. Nous avons considéré plusieurs topologies distinctes. Pour chaque topologie et pour chaque temps d'élimination du défaut, différents pourcentages du niveaux de la charge sont considérés [39].

- Les défauts examinés sont :
 - ◇ court circuit au niveau du nœud générateur 1
 - ◇ court circuit au niveau du nœud générateur 2
- Les topologies considérées sont :
 - ◇ Simulation avec ouvrage sein.
 - ◇ Simulation avec le critère N-1 (avec perte d'un ouvrage de transport).
- La charge varie de 70 % jusqu'à 130 % de la charge nominale du système.

L'ensemble d'apprentissage est représenté par une matrice de 106 lignes avec 10 colonnes, dont 9 constituent le vecteur d'entrée et une colonne pour la sortie du réseau représentant le temps critique d'élimination du défaut (CCT) en seconde.

III.4.2 Architecture du RNA utilisé

Le réseau de neurones artificiels adopté dans cette étude se compose de quatre couches, comprenant :

- une couche d'entrée liée aux caractéristiques mesurées des générateurs (angles internes, tensions relatives aux nœuds machines et puissances d'accélération),
- deux couches cachées, avec 12 neurones chacune,
- un neurone dans la couche de sortie donnant le temps critique d'élimination du défaut (CCT).

Les fonctions de transfert utilisées sont :

- TANSIG : fonction de transfert sigmoïde à tangente Hyperbolique
- PURELIN : fonction de transfert linéaire.

La fonction d'apprentissage utilisée est :

- TRAINLM : Fonction d'apprentissage mettant à jour les poids et les biais selon le critère d'optimisation de Levenberg-Marquardt.

Nous limitons les critères d'arrêts au nombre de cycles d'apprentissage à 20000 avec une erreur de 10^{-6} . La figure III.8 montre la progression de la courbe d'entraînement du réseau de neurones.

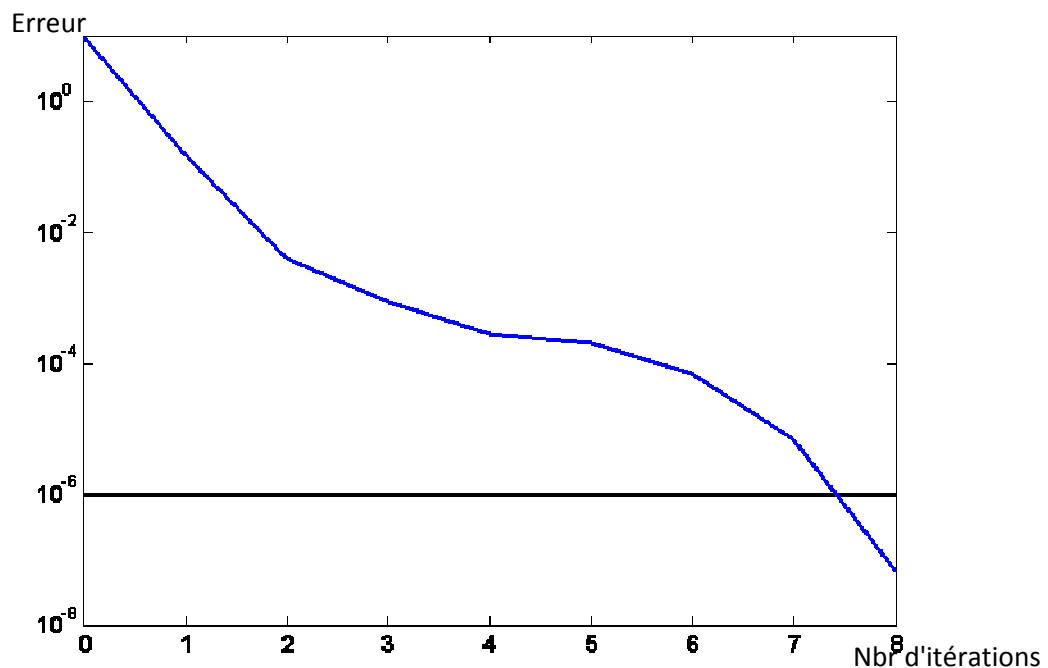


Figure III.8 : Evolution du processus d'entraînement du RNA

III.4.3 Phase de Test

Pour la validation du bon fonctionnement de notre réseau de neurones, il nous faut tester les résultats obtenus par les réseaux de neurones artificiels (RNA) avec ceux de l'intégration numérique (IN). Les résultats sont les suivants (tableau III. 2) :

Tableau III.2 Résultats du test du réseau de neurones

Type de défaut	Niveau de charge	Temps d'élimination du défaut (s)	
		IN	RNA
CC au nœud 1	0,9	0,452	0,451
	1	0,398	0,396
	1,1	0,377	0,374
CC au nœud 2	0,85	0,297	0,297
	0,9	0,296	0,296
	0,95	0,288	0,289
	1,1	0,195	0,197
	1,15	0,238	0,239

Nous avons vu, que les temps critiques calculés par l'intégration numérique, correspondent aux valeurs estimées par le réseau de neurones artificiels. Nous remarquons aisément la différence entre cette approche et l'approche classique, où chaque cas a nécessité la résolution des différentes équations différentielles non linéaires. Le temps énorme pris par cette résolution implique le grand intérêt d'utiliser les réseaux de neurones dans l'évaluation de la stabilité transitoire.

III.5 Conclusion

Nous avons présenté dans cette partie, quelques notions du domaine si vaste des réseaux de neurones artificiels. On a vu que les réseaux de neurones constituent un véritable moyen pour la résolution des problèmes pour lesquels les méthodes classiques ont montré leurs limites.

Des résultats de simulation précis ont été obtenus pour l'évaluation de stabilité transitoire du système IEEE- 3-Machines- 9-Nœuds. Comparée à la première approche, cette méthode est beaucoup plus prometteuse et plus flexible pour les changements apparaissant sur le réseau. En plus, on peut envisager une application en temps réel.

Malgré que cette méthode montre qu'elle possède de nombreux avantages, néanmoins elle nécessite plusieurs investigations afin d'être prête pour une implantation pratique comme simulateur des réseaux électriques. Cependant, dans le cadre de notre étude on vise à élaborer un programme complet capable de réduire la taille du vecteur d'entrée pour une meilleure exploitation du réseau de neurones. Le concept de cette approche est présenté avec tous les détails dans le chapitre suivant.

Chapitre IV

Optimisation des Réseaux de Neurones Artificiels par la Méthode des Plans d'Expériences

IV.1 Introduction

L'application des réseaux de neurones artificiels pour l'évaluation de la stabilité transitoire des systèmes d'énergie électrique, en temps réel, donne des résultats prometteurs. Pour les grands réseaux électriques, le nombre d'entrées élevé du réseau de neurones, a conduit les chercheurs à des études d'optimisation pour ne tenir compte que des paramètres influant considérablement sur le phénomène étudié. Les algorithmes génétiques et les techniques évolutionnaires sont les plus réputés dans le domaine d'optimisation du vecteur d'entrée.

Une nouvelle approche consiste à extraire le maximum d'informations avec un minimum de simulations dénommée méthode des plans d'expérience M.P.E (ou planification des expériences) [21].

Ce chapitre va s'articuler autour des deux parties suivantes : une présentation des fondements de base de la méthode des plans d'expériences M.P.E suivie de son application dans l'optimisation du vecteur d'entrée du réseau de neurones artificiels.

IV.2 Méthodes classiques et ses inconvénients

Traditionnellement, les essais sont effectués de manière séquentielle [40] en faisant varier les variables l'une après l'autre sans planification préalable de l'ensemble des essais à réaliser. On fixe le niveau de toutes les variables sauf une (variable x_i) et l'on mesure la grandeur y correspondante à différents niveaux de cette dernière. A la fin de l'expérimentation et à l'aide de cette première variable, on peut tracer une courbe représentative de $y = f(x_i)$ (Figure IV.1).

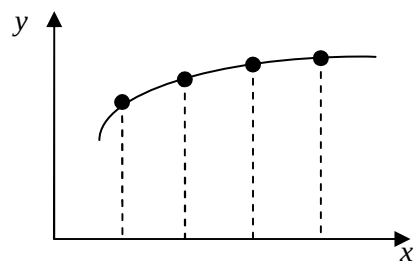


Figure IV.1 : Variable x_i prend différents niveaux, les autres variables étant fixes.

On peut refaire la même expérience avec chacune des autres variables. Si l'on désire étudier simplement sept variables et que l'on décide de prendre cinq points expérimentaux par variable, il faut exécuter $5^7 = 78125$ expériences. Ce chiffre représente un travail

gigantesque qui dépasse les limites de faisabilité. L'expérimentateur doit réduire le nombre des essais et il n'a, à sa disposition, que deux attitudes possibles :

1. Diminuer le nombre de points expérimentaux (pour trois points au lieu de cinq par variable, il y a encore $3^7=2187$ expériences à réaliser et pour deux points, il faut $2^7=128$ expériences. Ce qui est encore important et dépasse souvent les budgets disponibles ou le temps que l'on peut consacrer à l'étude).
2. Diminuer le nombre de variables (Pour quatre variables prenant chacune trois valeurs, il faudra exécuter $3^4=81$ essais).

IV.3 Notions d'espace expérimental

IV.3.a Plans d'expériences

De manière générale, la méthode des plans d'expériences cherchera à déterminer et à établir les liens existant entre 2 types de variables : la réponse (grandeur physique étudiée) et les facteurs (grandeurs physiques modifiables par l'expérimentateur sensées influer sur les variations de la réponse). Plus précisément, elle vise à comprendre les relations liant la réponse avec les facteurs, que les facteurs entre eux. Pour cela, la solution proposée consiste dans tous les cas à établir un modèle, exprimant la réponse en fonction des facteurs.

La planification statistique des expériences (ou plans d'expériences) consiste à préparer des programmes d'essais, en fonction d'un modèle statistique établi, afin d'atteindre les objectifs fixés aux essais de la façon la plus efficace et la plus économique en organisant l'exploitation statistique des résultats des essais. Elle consiste à faire varier, à la fois, les niveaux de toutes les variables à chaque expérience de manière programmée et raisonnée ce qui offre de nombreux avantages [21, 40]:

- Diminution du nombre des essais
- Nombre de facteurs étudiés peut être très grand
- Détection des interactions entre facteurs
- Précision sur les résultats
- Modélisation des résultats et obtention de l'optimum

La compréhension de la méthode des plans d'expériences s'appuie sur deux notions essentielles, celle d'espace expérimental et celle de modélisation mathématique des grandeurs étudiées.

IV.3.b Le facteur

La grandeur d'intérêt mesurée à chaque essai est appelée la réponse, où la valeur de cette réponse dépend de plusieurs variables. Au lieu de terme variable, nous utiliserons le mot facteur. En général un facteur varie entre deux bornes, la borne inférieure et la borne supérieure. Dans le langage des plans d'expériences, on dit que le facteur varie entre [21, 40, 41, 42] :

- le niveau bas (borne inférieure que l'on note le plus souvent par -1)
- le niveau haut (borne supérieure que l'on note le plus souvent par +1).

L'ensemble de toutes les valeurs que peut prendre le facteur entre le niveau bas et le niveau haut, s'appelle le domaine de variation du facteur ou plus simplement le domaine du facteur (figure IV.2). Un facteur peut prendre plusieurs niveaux à l'intérieur de son domaine de variation.

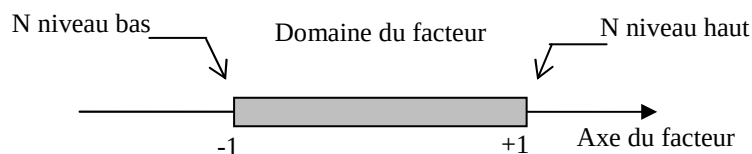
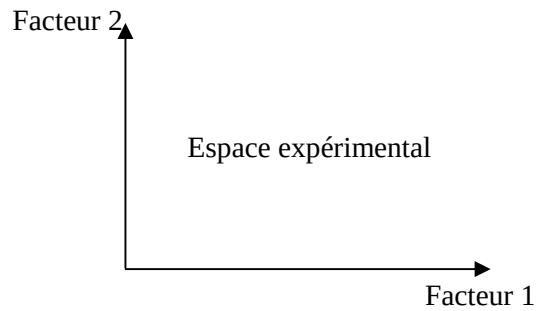


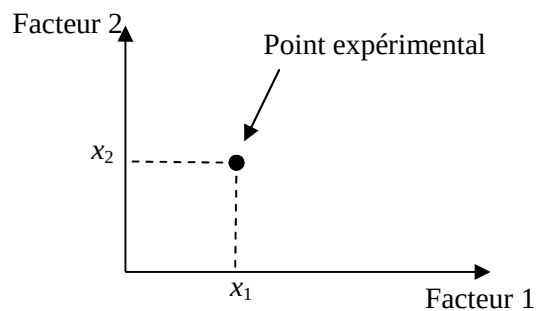
Figure IV.2 : Domaine de variation du facteur

Les facteurs étudiés peuvent être des variables continues, des variables discontinues que l'on peut ou que l'on ne peut pas ordonner. On parlera alors de facteurs discrets et de facteurs ordonnables. La température est un facteur continu, des personnes ou des méthodes de mesures sont des facteurs discrets. Grand, moyen, petit peuvent être les trois niveaux d'un facteur, niveau que l'on peut disposer selon un ordre croissant ou décroissant.

S'il y a un second facteur, il est représenté, lui aussi, par un axe. On définit, comme pour le premier facteur, son niveau bas, son niveau haut et son domaine de variation. Ce second axe est disposé orthogonalement au premier. On obtient ainsi un repère cartésien qui définit un espace euclidien à deux dimensions (figure IV.3). Cet espace est appelé l'espace expérimental.

**Figure IV.3 :** Espace expérimental

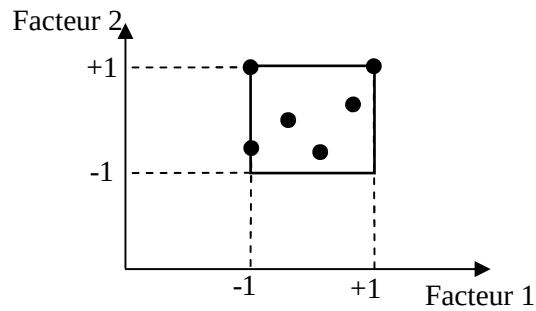
Le niveau x_1 du facteur 1 et le niveau x_2 du facteur 2 peuvent être considérés comme les coordonnées d'un point de l'espace expérimental (Figure IV.4).

**Fig. IV.4 :** point expérimental

Une expérience donnée est alors représentée par un point dans ce système d'axes. Un plan d'expériences est représenté par un ensemble de points expérimentaux.

IV.3.c Domaine d'Etude et Surface de Réponse

La réunion des domaines de chaque facteur définit le domaine d'étude. Ce domaine d'étude est la partie de l'espace expérimental retenu par l'expérimentateur pour faire ses essais. Une étude, c'est à dire un ensemble d'expériences bien définies, est représentée par une série de points disposés dans le domaine d'étude. Cette manière de représenter une expérimentation par un ensemble de points dans un espace cartésien est une représentation géométrique de l'étude (Figure IV.5) [41].

**Fig. IV.5 :** Domaine d'étude

Un modèle est donc une relation de la forme suivante :

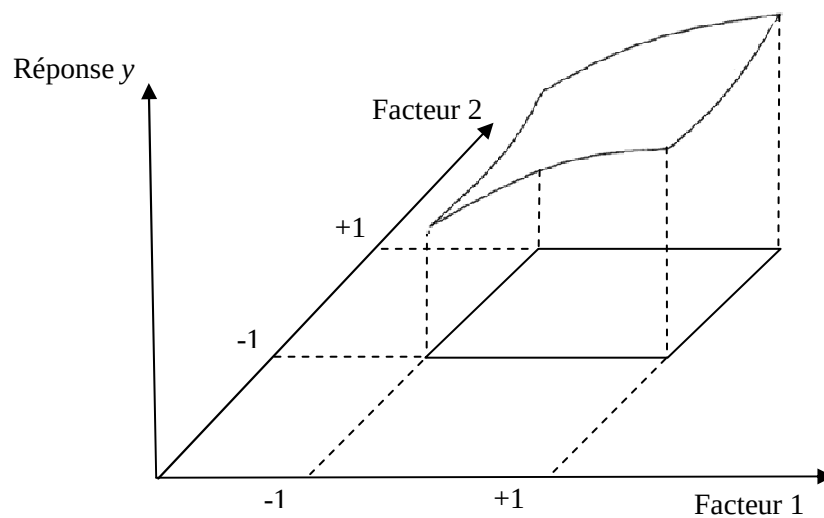
$$y = f(x) \quad (\text{IV.1})$$

Où y : est une réponse en particulier.

x : prenant ses valeurs dans le domaine d'étude.

Le domaine d'étude peut donc être vu comme un ensemble de valeurs autorisées [41].

La représentation géométrique de la réponse s'effectue donc dans un espace ayant une dimension de plus que celle de l'espace expérimental. A l'ensemble de tous les points du domaine d'étude correspond un ensemble de réponses qui se localisent sur une surface appelée surface de réponse (Figure IV.6).

**Fig. IV.6 :** Surface de réponse

IV.3.d Coordonnées centrées réduites (Notation de YATE)

La notation de YATE permet une représentation simple des combinaisons des niveaux et permet un calcul aisé des effets et des interactions. Les niveaux sont représentés par les signes + et - symbolisant la valeur haute et basse d'un facteur.

Lorsqu'on attribue la valeur (-1) au niveau bas d'un facteur et la valeur (+1) au niveau haut, on effectue deux modifications importantes :

- on déplace l'origine des mesures
- on change l'unité des mesures

Ces deux modifications entraînent l'introduction de nouvelles variables que l'on appelle variables centrées réduites, (centrées pour indiquer le changement d'origine et réduites pour signaler la nouvelle unité), ce qui permet de comparer des variables de grandeurs totalement différentes. Le passage des variables d'origine z aux variables centrées réduites x , et inversement, est donné par la formule suivante :

$$x = \frac{z - z_0}{pas} \quad (IV.2)$$

$$\text{Où : } z_0 = \frac{\text{niveau haut} + \text{niveau bas}}{2}$$

$$pas = \frac{\text{niveau haut} - \text{niveau bas}}{2}$$

z_0 : est la moyenne des variables courantes

pas : est la variation entre la position moyenne de la variable et une extrémité du domaine

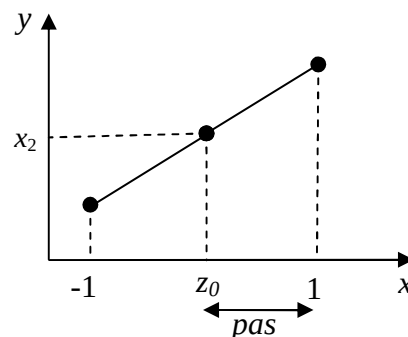


Figure IV.7 : Notation de YATE

Grâce à cette représentation des niveaux, le domaine d'étude est intrinsèquement discrétisé, ce qui permet d'utiliser des variables quantitatives (ou réelles) aussi bien que des variables qualitatives (ou variables catégorielles). L'intérêt des variables centrées réduites est de pouvoir présenter les plans d'expériences de la même manière quels que soient les domaines d'études retenus et les unités des facteurs. La théorie des plans d'expériences présente ainsi une grande généralité [40].

IV.3.e Plan d'Expériences

Chaque point du domaine d'étude représente des conditions opératoires possibles, donc une expérience que l'opérateur peut réaliser.

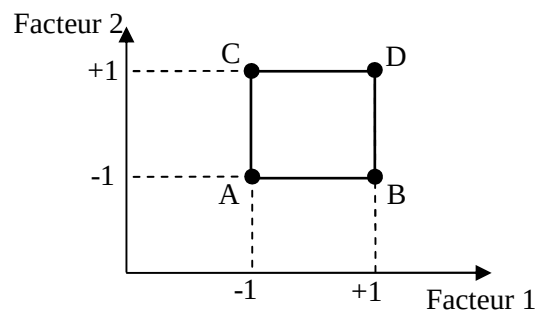


Figure IV.8 : Sommets A, B, C et D du domaine d'étude

Le choix du nombre et de l'emplacement des points d'expériences est le problème fondamental des plans d'expériences. On a l'habitude d'appeler plans d'expériences des ensembles de points expérimentaux répondant à des propriétés bien précises.

IV.4 Plans Factoriels à deux niveaux

Les plans d'expériences factoriels sont d'une importance et utilité particulièrement importante dans les études préliminaire destinées à rechercher les facteurs prédominants dans le cas où de nombreux facteurs sont en jeu. Il est alors souvent suffisant de se limiter à deux modalités ou niveaux pour chaque facteur, dans ce cas une expérience sans répétition comportera 2^n unités d'essais ce qui justifie le nom de «plans de la série 2^n » donné à ce type de plan très répandu et pour lesquels de nombreux travaux ont été effectués, compte tenu de sa grande efficacité [40].

L'introduction aux plans factoriels complets permet d'introduire les principales notations utilisées par la méthode des plans d'expériences. Il servira également de base à une généralisation des écritures mathématiques utilisées. Les plans factoriels à deux niveaux sont les plus simples, ils permettent de bien comprendre le principe de la méthode et leurs applications où le nombre d'expériences à réaliser se calcule par :

$$\text{Le nombre d'expériences } N = 2^p$$

IV.4.a Matrice d'Expériences M.E

La présentation géométrique d'un plan d'expériences est commode pour imaginer la position des points expérimentaux dans le domaine d'étude. Mais elle ne peut plus être employée dès que le nombre de facteurs est supérieur à trois. Pour les espaces multidimensionnels, nous adopterons une représentation en forme de tableau ou matrice d'expériences. La matrice d'expériences donnée par le tableau IV.1 définit les essais à réaliser (ou point expérimental) [41].

Tableau IV.1 Matrice d'expériences d'un plan 2^2

N° essai	Facteur A	Facteur B
1	-1	-1
2	1	-1
3	-1	1
4	1	1

Le domaine d'étude peut être représenté dans l'espace expérimental des facteurs à k dimensions. Pour $k = 2$, nous obtenons un carré. Les points expérimentaux sont situés aux quatre sommets du carré (Figure IV.9).

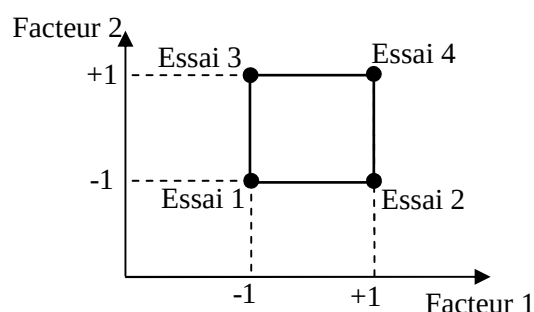


Figure IV.9 : Domaine d'étude d'un plan 2^2

Pour trois facteurs, le nombre des essais à réaliser est $2^3 = 8$ essais. La matrice des essais ou d'expériences est donnée par le tableau IV.2.

Tableau IV.2 Matrice d'expérience d'un plan 2^3

essai N°	Facteur 1	Facteur 2	Facteur 3
1	-1	-1	-1
2	1	-1	-1
3	-1	1	-1
4	1	1	-1
5	-1	-1	1
6	1	-1	1
7	-1	1	1
8	1	1	1

Lorsque $k = 3$, le domaine expérimental est représenté par un cube, dont les huit sommets représentent les huit essais du plan (Figure IV.10).

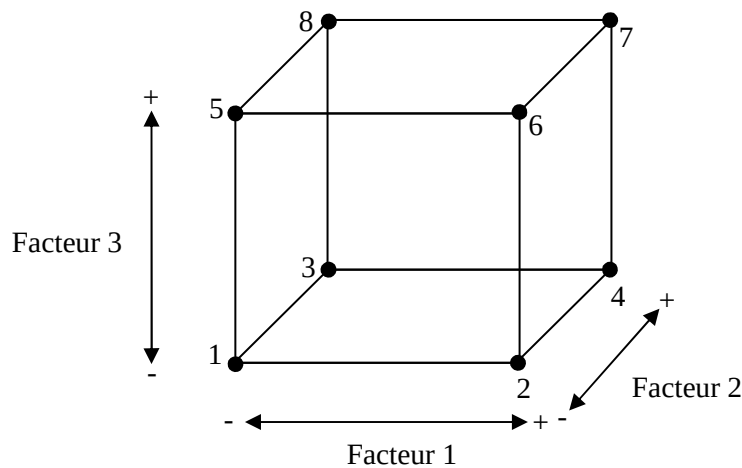


Figure IV.10 : Domaine expérimental d'un plan 2^3

De manière générale, pour k facteurs le nombre d'essais est de 2^k . La matrice des essais comporte k colonnes et 2^k lignes. Elle est constituée par :

- Colonne du 1^{er} facteur : alternance de -1 et + 1
- Colonne du 2^{ème} facteur : alternance de -1 et +1 de 2 en 2
- Colonne du 3^{ème} facteur : alternance de -1 et +1 de 4 en 4
- Colonne du 4^{ème} facteur : alternance de -1 et +1 de 8 en 8, ... etc.

Quand $k > 3$, la représentation géométrique du domaine n'est plus possible mais les points expérimentaux sont toujours aux sommets d'un hyper-cube à k dimensions.

IV.4.b Traitement du plan d'expériences pour $k=3$

Par construction, tout plan factoriel complet est orthogonal. Il est très facile d'estimer les paramètres à partir de la matrice d'expériences, il suffit de construire le tableau IV.2.

On reporte d'abord le signe des facteurs dans la matrice d'expériences, ensuite la colonne I est remplie de signes ' + ', puis les colonnes des interactions (AB , AC , BC et ABC) par la règle du produit des signes comme montré dans le tableau IV.3.

Tableau IV.3 Matrice d'expériences et vecteur des effets

N°	moyenne	A	B	C	AB	AC	BC	ABC	Réponse
1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	Y1
2	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	Y2
3	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	Y3
4	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	Y4
5	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	Y5
6	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	Y6
7	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	Y7
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	Y8

Effets	I	E_A	E_B	E_C	I_{AB}	I_{AC}	I_{BC}	I_{ABC}
--------	---	-------	-------	-------	----------	----------	----------	-----------

I : représente la moyenne générale.

E_i : l'effet du facteur i .

I_{ij} : l'effet de l'interaction des facteurs i et j .

Y : réponse ou résultat de l'expérience.

Pour simplifier les notations, l'effet du facteur A est quelquefois simplement représenté par A .

$$E_A \equiv A$$

$$I_{AB} \equiv AB$$

IV.4.c Modèle Mathématique

Un avantage primordial de la méthode des plans d'expériences est qu'un modèle mathématique apparaît spontanément à partir des effets et des interactions.

$$\hat{Y} = I + A + B + C + AB + AC + BC + ABC \quad (\text{IV.3})$$

$\hat{Y}$: représente la réponse estimée par le modèle

Pour un modèle complet, les valeurs de $\hat{Y}$ correspondent aux valeurs de Y relevées. Cette formule peut se mettre sous la forme plus explicite :

$$\hat{Y} = I + E_A \cdot a + E_B \cdot b + E_C \cdot c + I_{AB} \cdot a \cdot b + I_{AC} \cdot a \cdot c + I_{BC} \cdot b \cdot c + I_{ABC} \cdot a \cdot b \cdot c \quad (\text{IV.4})$$

où a , b et c représentent le niveau de chaque facteur.

Rappelons que a , b et c sont des grandeurs centrées réduites, leur valeurs sont comprises entre -1 et +1. Le calcul de la réponse estimée par le modèle se fait par addition ou soustraction des effets et des interactions.

Les interactions intervenant sur 2 facteurs sont appelées interactions d'ordre 2 (**AB**, **AC**, **BC**), de même les interactions d'ordre 3 concernent 3 facteurs (**ABC**). Ces derniers sont en général très faibles par rapport aux effets principaux, c'est pourquoi elles sont fréquemment négligées dans la représentation du modèle mathématique.

D'après ce qui précède, l'effet des facteurs A , B et C est donné par :

$$E_A = \frac{1}{8} (-y_1 + y_2 - y_3 + y_4 - y_5 + y_6 - y_7 + y_8) \quad (\text{IV.5})$$

$$E_B = \frac{1}{8} (-y_1 - y_2 + y_3 + y_4 - y_5 - y_6 + y_7 + y_8) \quad (\text{IV.6})$$

$$E_C = \frac{1}{8} (-y_1 - y_2 - y_3 - y_4 + y_5 + y_6 + y_7 + y_8) \quad (\text{IV.7})$$

L'effet de chaque facteur est calculé par rapport à la moyenne générale, qui correspond au centre du domaine d'étude. Le calcul simple des effets provient des propriétés algébriques de la matrice des effets.

Les interactions entre les facteurs A , B et C sont équivalent à :

$$I_{AB} = \frac{1}{8} (+ y_1 - y_2 - y_3 + y_4 + y_5 - y_6 - y_7 + y_8) \quad (\text{IV.8})$$

$$I_{AC} = \frac{1}{8} (+ y_1 - y_2 + y_3 - y_4 + y_5 - y_6 - y_7 + y_8) \quad (\text{IV.9})$$

$$I_{BC} = \frac{1}{8} (+ y_1 + y_2 - y_3 - y_4 - y_5 - y_6 + y_7 + y_8) \quad (\text{IV.10})$$

$$I_{ABC} = \frac{1}{8} (- y_1 + y_2 + y_3 - y_4 + y_5 - y_6 - y_7 + y_8) \quad (\text{IV.11})$$

La moyenne I est donnée par :

$$I = \frac{1}{8} (+ y_1 + y_2 + y_3 + y_4 + y_5 + y_6 + y_7 + y_8) \quad (\text{IV.12})$$

On constate que :

- toutes les réponses participent au calcul de l'effet
- chaque réponse est précédée d'un signe et que la suite de ces signes est la même que celle de la colonne du facteur correspondant dans la matrice d'expériences (Tableau IV.3)
- il y a un coefficient ($\frac{1}{8}$), dont le dénominateur est égal au nombre d'expériences effectuées.

La propriété d'orthogonalité des facteurs fait de cette matrice, une matrice d'**Hadamard**. Notée par $[X]$, elle vérifie :

$$[X]^t \cdot [X] = n \cdot [I] \quad (\text{IV.13})$$

Où $[I]$ est la matrice identité et n le nombre d'expériences.

Calculer les coefficients du modèle c'est résoudre :

$$[X] \cdot [E] = [Y] \quad (\text{IV.14})$$

Où $[Y]$ est le vecteur des réponses.

$[E]$ est le vecteur des effets.

De ce fait, pour un plan factoriel complet, $[E]$ est donné par :

$$[E] = [X]^{-1} \cdot [Y] \quad (\text{IV.15})$$

Soit grâce aux propriétés de la matrice $[X]$:

$$[E] = \frac{1}{n} \cdot [X]^t \cdot [Y] \quad (\text{IV.16})$$

IV.4.d Avantages et inconvénients des plans factoriels complets à deux niveaux

Les avantages des plans factoriels sont nombreux, dont les principaux sont [41] :

- Les plans factoriels complets sont faciles à construire.
- Comme chaque facteur ne prend que deux niveaux les essais sont faciles à contrôler et les risques d'erreur sont minimisés.
- Le calcul des effets et des interactions est très simple.
- L'interprétation des résultats est à la portée de tout expérimentateur et ne demande pas des connaissances approfondies en statistique.
- Les résultats obtenus peuvent être utilisés en partie ou en totalité, soit pour explorer une autre zone du domaine expérimental soit, pour établir un modèle mathématique de degré plus élevé.

L'inconvénient majeur de ces plans est que le nombre des essais à réaliser devient rapidement important en augmentant le nombre de facteurs.

IV.5 Application du plan factoriel complet

On désire étudier l'influence de chaque entrée du réseau de neurones sur l'évaluation du temps critique d'élimination du défaut CCT. Pour cela, nous allons procéder à la construction du plan complet en tenant compte des angles internes, des tensions aux nœuds machines ainsi que les puissances d'accélération pour chaque groupes de production lors du défaut pour le réseau IEEE 3 machines- 9 nœuds.

De ce fait, pour la construction du plan factoriel complet, nous définissons :

Les facteurs (vecteur d'entrée) :

- L'angle interne avant le défaut du groupe 1.
- L'angle interne avant le défaut du groupe 2.
- L'angle interne avant le défaut du groupe 3.

- La puissance d'accélération du groupe 1.
- La puissance d'accélération du groupe 2.
- La puissance d'accélération du groupe 3.
- La tension au nœud 1.
- La tension au nœud 2.
- La tension au nœud 3.

Les niveaux

- Le niveau bas (-1) : la valeur minimale de chaque facteur
- Le niveau haut (+1) : la valeur maximale de chaque facteur

La réponse

- temps critique d'élimination du défaut CCT

Le nombre d'expériences à réaliser est de : $2^9=512$; la dimension de la matrice d'expérience (ME) est donc 512 x 512.

Dans notre cas, les expériences sont les simulations effectuées via le programme élaboré dans le troisième chapitre, pour la résolution du problème de la stabilité transitoire par réseau de neurones artificiel (RNA). Les résultats sont donnés par le tableau IV.4.

Tableau IV.4 Matrice d'expériences du plan factoriel complet

	Moy	δ_1	δ_2	δ_3	V_1	V_2	V_3	P_1	P_2	P_3		CCT
N° Exp	I	a	b	c	d	e	f	g	h	i		Y
1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1		1,705
2	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1		1,122
3	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1		1,643
4	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1		1,159
5	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1		1,000
6	1	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1		1,541
7	1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1		0,475
8	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1		0,975
9	1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1		0,332
10	1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1		0,360
11	1	-1	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1		0,570
12	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1		0,176
13	1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1		0,307
14	1	1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1		0,588
15	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1		0,221
16	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1		0,430
17	1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1		1,616
18	1	1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1		0,471
19	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1		0,177
20	1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1		1,018
21	1	-1	-1	1	-1	1	-1	-1	-1	-1		1,404
22	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	-1	-1		0,153
23	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	-1		0,451
24	1	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	-1		1,229
25	1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1		0,574
26	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1		0,229
27	1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1		0,515
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		-
506	1	1	-1	-1	1	1	1	1	1	1		0,166
507	1	-1	1	-1	1	1	1	1	1	1		0,013
508	1	1	1	-1	1	1	1	1	1	1		0,191
509	1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1		0,132
510	1	1	-1	1	1	1	1	1	1	1		0,219
511	1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1		0,761
512	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		0,134

IV.6 Plans factoriels fractionnaires

Les plans factoriels fractionnaires (PFF) sont très utiles et mettent en évidence l'intérêt primordial de la méthode des plans d'expériences en permettant de diminuer considérablement le nombre d'expériences nécessaires à la construction d'un modèle. Cependant, il est prudent de garder un certain esprit critique face aux résultats que fournissent les plans fractionnaires, car ils nécessitent une certaine maîtrise de leur construction et de l'interprétation des résultats [43].

IV.6.a Notions de Contrastes et Aliases

De manière générale, à partir des expressions des effets A et BC précédente (tableau IV.3), l'opération $A+BC$ donne :

$$A+BC = \frac{1}{4} (-y_5 + y_2 - y_3 + y_8) \quad (\text{IV.17})$$

On retrouve ici le calcul de la somme des effets des facteurs A et BC par l'utilisation des essais n° 5, 2, 3 et 8 donnés par le tableau IV.5.

Tableau IV.5 Plan factoriel fractionnaire 2^{3-1}

		Facteurs			
		I	A'	B'	C'
N° d'exp.	5	+	-	-	+
	2	+	+	-	-
	3	+	-	+	-
	8	+	+	+	+

De la même façon, on trouve que :

$$B+AC = \frac{1}{4} (-y_5 + y_2 - y_3 + y_8) \quad (\text{IV.18})$$

et

$$C+AB = \frac{1}{4} (y_5 + y_2 - y_3 + y_8) \quad (\text{IV.19})$$

Ce plan ne permet plus le calcul des interactions entre facteurs principaux. Le calcul des effets des facteurs A' , B' et C' se réalise par les formules :

$$\begin{cases} A' = A + B.C \\ B' = B + A.C \\ C' = C + A.B \end{cases} \quad (\text{IV.20})$$

On voit ainsi que les effets calculés dans ce nouveau plan sont en fait des sommes d'effets : ce sont des **contrastes**. On dit que les effets A et BC sont **aliasés** (A et BC sont des aliases). Le plan réalisé précédemment est équivalent à un plan 2^2 à la différence que la troisième colonne ne représente plus l'interaction des deux premiers facteurs A' et B' mais un troisième facteur C' .

Afin de faire la différence entre les plans complets et les plans fractionnaires, on notera ces derniers en faisant apparaître la dimension de leurs plans complets d'origine. Le précédent tableau décrit donc un plan 2^{3-1} , cela signifie que l'étude porte sur trois facteurs par l'utilisation d'un plan fractionnaire à $2^{3-1}=4$ expériences.

De façon générale, tout plan fractionnaire sera noté 2^{k-r} , où r désigne alors le facteur de réduction appliqué au plan factoriel initial. Par conséquent, on voit qu'il est possible de réaliser des plans factoriels fractionnaires, c'est-à-dire de réaliser moins d'essais que le plan factoriel complet correspondant. Cependant, cette simplification se paye de plusieurs façons :

- il n'est plus possible de calculer toutes les interactions entre tous les facteurs.

Ce point n'est pas fondamental si l'objectif est uniquement de déterminer l'influence relative des facteurs entre eux (et donc de ne pas considérer les interactions correspondantes).

- les effets calculés dans des plans factoriels fractionnaires sont aliasés.

Cela signifie qu'ils ne traduisent pas directement l'effet des facteurs considérés individuellement mais d'ensembles de facteurs et d'interactions. Il est donc parfois impossible de conclure de façon sûre sur l'effet d'un facteur, puisque dans un contraste, chaque terme peut se révéler influent. Cependant, il est couramment admis que, plus les interactions sont d'ordre élevé, moins elles sont supposées être influentes. Il est préférable d'aliaser avec des interactions d'ordre élevé en priorité [43, 44].

A ces remarques, on peut ajouter qu'on procède parfois au désaliasage des effets en réalisant des expériences supplémentaires. Il se peut également que l'on néglige délibérément certains termes dans les expressions des contrastes (interactions d'ordre supérieur ou égal à trois par exemple).

IV.6.b Générateurs d'alias

Dans le cas du plan complet 2^3 , on aboutit au tableau suivant :

Tableau IV.6 Matrice de calcul des contrastes pour les deux demi plan fractionnaire (2^{3-1})

Exp N°	I	A	B	C	AB	AC	BC	ABC
5	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1
2	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1
3	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1
8	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1
6	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1
7	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1
4	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1

Nous avons trouvé que si l'on ne considérait que les expériences 5, 2, 3 et 8, on aboutissait aux alias suivants :

pour $I = A.B.C$ on déduit :

$$A \times I = A \times A.B.C \quad (\text{IV.21})$$

d'où :

$$A = B.C \quad (\text{IV.22})$$

De même, en multipliant respectivement par B et C :

$$B = A.C \quad (\text{IV.23})$$

$$C = A.B$$

Les mêmes calculs peuvent être réalisés pour le calcul des contrastes d'interactions.

Prendre un générateur d'alias tel que $I = A.B.C$, revient à choisir les expériences d'un plan complet de base 2^3 telles que leurs valeurs dans la colonne I soient égales à la colonne $A.B.C$.

Le générateur d'alias de la moitié inférieure du tableau IV.6 est :

$$I = - A.B.C \quad (IV.24)$$

Cela revient ainsi à sélectionner les essais qui ont un contenu opposé (en signe) des colonnes I et A.B.C. L'ensemble des points correspondant est dit complémentaire.

Ainsi, l'adoption de tout générateur d'alias divise le précédent plan en deux. Il faut donc r alias pour couper en 2^r un plan factoriel complet. Où les r générateurs définissant un plan fractionnaire sont qualifiés d'indépendants.

Lorsque $r > 1$, on définit les générateurs dépendants des générateurs indépendants, en les multipliant entre eux 2 à 2, puis 3 à 3, et ainsi de suite.

Enfin, on relèvera le fait que, pratiquement, c'est à partir des générateurs (indépendants et dépendants) que les alias sont calculés. En effet, pour cela, ils doivent être multipliés par les effets individuels des k facteurs.

IV.6.c Résolution d'un plan fractionnaire

La résolution d'un plan fractionnaire 2^{k-r} est la longueur du plus petit générateur (dépendant ou indépendant) dans le meilleur des cas. C'est un nombre entier strictement positif écrit souvent en chiffres romains.

Il existe généralement plusieurs combinaisons de générateurs indépendants possibles, pour la construction d'un plan fractionnaire de même définition. Toutes ces combinaisons ne donnent pas la même résolution au plan ainsi défini, en raison du mode de déduction des générateurs dépendants.

Vus les points abordés dans les références [21, 43, 44], il apparaît que les plans fractionnaires ne peuvent présenter un intérêt que s'ils sont de résolution supérieure ou égale à III. On recherche toujours la meilleure combinaison de générateurs indépendants pour obtenir la plus grande résolution possible du plan 2^{k-r} . Cela permet ainsi d'aliaser les effets des facteurs principaux avec ceux d'interactions d'ordre le plus élevé possible.

IV.6.d Plans fractionnaires admissibles

Tous les plans fractionnaires sont notés 2^{k-r} , indiquant qu'ils sont directement issus de plans factoriels complets 2^k . Cette écriture donne également le nombre d'expériences n à réaliser par ce plan. Il est nécessaire d'avoir dans un premier temps [45, 46, 47] :

$$0 < r < k \quad (\text{IV.25})$$

On ne retient pas ici la généralisation de l'écriture 2^{k-r} pour $r = 0$ des plans fractionnaires comme étant celle des plans factoriels complets. De plus, lors de la construction de plans fractionnaires, il faut exprimer les effets des r facteurs supplémentaires en fonction des effets et interactions entre les $(k-r)$ facteurs initiaux.

Il faut donc que la relation suivante soit respectée :

$$r \leq 2^{k-r} - 1 \quad (\text{IV.26})$$

Enfin, un plan fractionnaire n'est intéressant que s'il est au minimum de résolution de III. Il faut donc éviter de définir les r facteurs supplémentaires en fonction des effets simples des $(k-r)$ facteurs d'origine. Par conséquent, la relation précédente doit être corrigée comme suit :

$$r \leq 2^{k-r} - 1 - (k - r) \quad (\text{IV.27})$$

Le fait que r doit être un nombre entier, finalement on peut écrire :

$$r \leq E \left(k - \frac{\ln(1+k)}{\ln 2} \right) \quad (\text{IV.28})$$

avec : E désigne la partie entière ($r \in \mathbb{N}$)

On vérifie bien que les plans fractionnaires ne sont définis que pour des valeurs de k strictement supérieures à 2. Cette relation permet également de constater que les plans fractionnaires 2^{k-r} permettent de calculer des modèles polynomiaux du premier ordre saturés, lorsque $1+k=2^x$ avec x un entier (valant dans ce cas $k-r$). Le tableau IV.7 donne les valeurs maximales $r_{\max}$ de r en fonction de k .

Tableau IV.7 Valeurs maximales de r ($r_{\max}$)

k	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$r_{\max}$	1	1	2	3	4	4	5	6	7

Dans la grille du tableau IV.8 qui suit, sont données les résolutions maximales des plans fractionnaires réalisables, pour les premières valeurs de k .

Tableau IV.8 Résolutions maximales des premiers plans fractionnaires réalisables

		Nombre de facteurs (k)								
		3	4	5	6	7	8	9	10	11
Nombre d'expériences n du plan fractionnaire	4	III								
	8		IV	III	III	III				
	16			V	IV	IV	IV	III	III	III
	32				VI	IV	IV	IV	IV	IV
	64					VII	V	IV	IV	IV
	128						VIII	VI	V	V
	256							IX	VI	V
	512								X	VII
	1024									XI
										r=1

Pour résumer, les étapes successives suivantes sont nécessaires pour la construction d'un plan factoriel fractionnaire :

1. prise en compte du plan factoriel complet de base à $N=2^k$ expériences ;
2. détermination du nombre admissible d'expériences $N'=2^{k-r}$ avec $0 < r \leq r_{max}$;
3. recherche des meilleurs générateurs indépendants ;
4. déduction des contrastes (alias).

IV.6.e Plans fractionnaires 2^{9-5}

Pour étudier le vecteur d'entrées à 9 facteurs, le plan complet contient $2^9 = 512$ combinaisons des facteurs et interactions, le plan $2^{9-5} = 2^4$ nous permettra de recenser que seize simulation. Il nous faut cinq interactions pour étudier les facteurs supplémentaires, les résultats sont montrés par le tableau IV. 9.

Tableau IV.9 Plan factoriel fractionnaire 2^{9-5}

N° exp	Moy	$\delta 1$	$\delta 2$	$\delta 3$	$V1$	$\delta 1\delta 2$	$\delta 1\delta 3$	$\delta 1V1$	$\delta 2\delta 3$	$\delta 2V1$	$\delta 3V1$	$V2=\delta 1\delta 2\delta 3$	$P2=\delta 1\delta 2V1$	$P1=\delta 1\delta 3V1$	$V3=\delta 2\delta 3V1$	$P3=\delta 1\delta 2\delta 3V1$	Y Exp
	I	a	b	c	d	ab	ac	ad	bc	bd	cd	e=abc	h=abd	g=acd	f=bcd	i=abcd	
24	1	1	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1,229
47	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	0,175
78	1	1	-1	1	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	0,355
117	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1	0,329
140	1	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1,335
179	1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	-1	1	-1	0,176
180	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	1,066
183	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	0,213
184	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	0,339
187	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1,06
347	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	0,454
356	1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	1	0,139
413	1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	1	0,306
418	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	0,125
455	1	-1	1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	1	0,357
512	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,134
Effet	0,487	0,103	0,013	-0,111	-0,073	0,106	-0,019	0,024	0,085	0,098	-0,061	0,017	-0,023	-0,106	-0,283	-0,123	

Nous pouvons constater que l'utilisation d'un plan fractionnaire 2^{9-5} nous a permis un classement par ordre d'influence des paramètres. Par conséquent, seuls les facteurs les plus influents pourront être sélectionnés pour une optimisation du vecteur d'entrée. De ce fait, le nombre de simulations utiles sera considérablement diminué permettant de gagner un temps précieux et une simplification du problème.

Une représentation des facteurs par leurs ordres d'importance suivant la fonction réponse CCT est donnée par la figure IV. 11 ci-après.

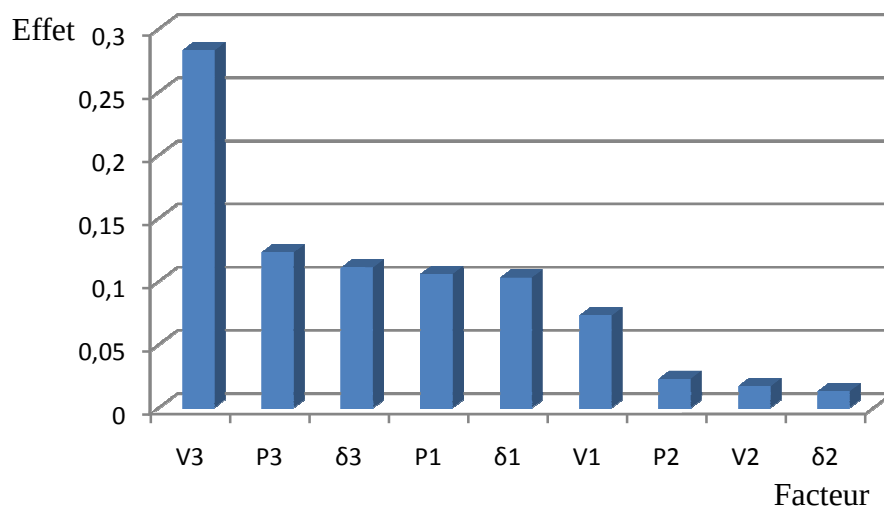


Figure IV.11 : Classement par ordre d'influence des facteurs

Il est évident que les paramètres du nœud 3 ont une influence plus significative sur l'estimation du temps critique par rapport aux nœuds 1 et 2. Cependant, l'analyse de la variance permet de définir un seuil à partir duquel on peut tester la dominance de chaque facteur.

IV.7 Analyse de la variance

IV.7.a Notion de degrés de liberté

Le nombre de degrés de liberté ddl associé à un facteur f est le nombre de niveaux qu'il prend lors de la réalisation du plan minoré de 1.

On a donc dans tous les cas :

$$ddl_i = Nn_i - 1 \quad (\text{IV.29})$$

Or, dans le cas des plans factoriels complets, on a l'égalité :

$$\prod_{j=1}^k Nn_j = N \quad (\text{IV.30})$$

Le calcul des degrés de liberté d'une interaction est le produit des *ddl* des facteurs mis en jeu dans cette interaction.

Afin de pouvoir définir le nombre de degrés de liberté affecté à ce modèle, le tableau IV.10 présente une explication regroupant les étapes fondamentales de le faire :

Tableau IV.10 Règle de calcul du *ddl*

	<i>ddl</i>
Moyenne	1
Effet	nombre de niveaux -1
Interaction	nombre de <i>ddl</i> du facteur n°1 X nombre de <i>ddl</i> du facteur n°2

Le modèle du plan fractionnaire $\hat{Y}$ représente les *ddl* par :

$\hat{Y}$	$= I + a + b + c + d + ab + \dots, + abc + \dots, + abcd$							
niveaux	2	2	2	2				
<i>ddl</i>	1	1	1	1	1	1	1	1

Enfin, notons la relation donnant entre autre le nombre de degrés de liberté total ddl_t par :

$$ddl_t = \sum_{\text{facteurs}} ddl_i + \sum_{\text{int éractions}} ddl_i \quad (\text{IV.31})$$

IV.7.b Calcul de la variance

Le calcul de la variance pour un facteur A est donnée par VA :

$$VA = \frac{\sum A_i^2}{ddl \text{ facteur } A} \quad (IV.32)$$

Généralement, lorsqu'on utilise le modèle pour estimer la réponse on mesure un écart appelé résidus entre la valeur calculée et la valeur réelle expérimentale.

$$r = Y - \hat{Y} \quad (IV.33)$$

Lorsqu'il existe, l'équation de la variance fait apparaître un nouveau terme appelé communément variance résiduelle Vr :

$$Vr = \frac{\sum r^2}{ddl \text{ residus}} \quad (IV.34)$$

La détermination de Vr est nécessaire puisqu'elle intervient dans les tests composant l'analyse de la variance. En effet, c'est à cette variance résiduelle que les variances des facteurs sont comparées afin de déterminer les facteurs significatifs.

IV.7.c Test de Fisher-Snedecor

L'analyse de la variance permet d'estimer si les effets calculés sont significatifs. Le test consiste à comparer le rapport VA/Vr avec la valeur théorique de la table de Fisher-Snedecor se trouvant dans de nombreux ouvrages statistiques. Si F -expérimental (VA/Vr) est supérieur à F -théorique (tableau IV.11), alors l'effet est significatif.

On calcule alors le rapport suivant, pour le facteur considéré :

$$F_{exp} = \frac{VA}{Vr} \quad (IV.35)$$

L'analyse de la variance permet donc de déterminer les facteurs dont leurs probabilités soient inférieures à un niveau fixé arbitrairement. Selon ces niveaux de signification, ces termes peuvent être rejetés en diminuant la dimension du vecteur d'entrée du réseau de neurones.

Le test de Fisher étant réalisé en prenant F -théorique 95% comme référence, ainsi, le nombre de facteurs rejetés suivant F -expérimental calculé. Le tableau IV. 11 réunit les résultats des calculs précédents.

Tableau IV.11 Test de Fisher-Snedecor

Facteur	Effet	Variance	Var Résid	Fexp	F-théo 95%	Domination
V_3	2,83E-01	1,28E+00	3,56E-03	3,61E+02	5,99E+00	OUI
P_3	1,23E-01	2,41E-01	3,56E-03	6,77E+01	5,99E+00	OUI
δ_3	1,11E-01	1,97E-01	3,56E-03	5,53E+01	5,99E+00	OUI
P_1	1,06E-01	1,80E-01	3,56E-03	5,06E+01	5,99E+00	OUI
δ_1	1,03E-01	1,70E-01	3,56E-03	4,79E+01	5,99E+00	OUI
V_1	7,32E-02	8,57E-02	3,56E-03	2,41E+01	5,99E+00	OUI
P_2	2,29E-02	8,37E-03	3,56E-03	2,35E+00	5,99E+00	NON
V_2	1,71E-02	4,66E-03	3,56E-03	1,31E+00	5,99E+00	NON
δ_2	1,29E-02	2,67E-03	3,56E-03	7,51E-01	5,99E+00	NON

IV.8 Exploitation des résultats obtenus

L'application de la méthode des plans d'expériences nous a permis de réduire le vecteur d'entrée du réseau de neurones composé de 9 paramètres initialement, à un vecteur composé de 6 variables jugées les plus représentatives de notre système.

IV.8.a Application du nouveau RNA

Le nouveau réseau de neurones artificiels obtenu à partir de l'étude précédente se compose de :

- une couche d'entrée constituée de 6 entrées,
- deux couches cachées, formées de 12 neurones chacune,
- un neurone dans la couche de sortie pour le temps critique d'élimination du défaut.

Nous adoptons les critères d'arrêts similaires à l'apprentissage du premier réseau. La figure IV.12 montre la progression de la courbe d'entraînement du nouveau réseau de neurones.

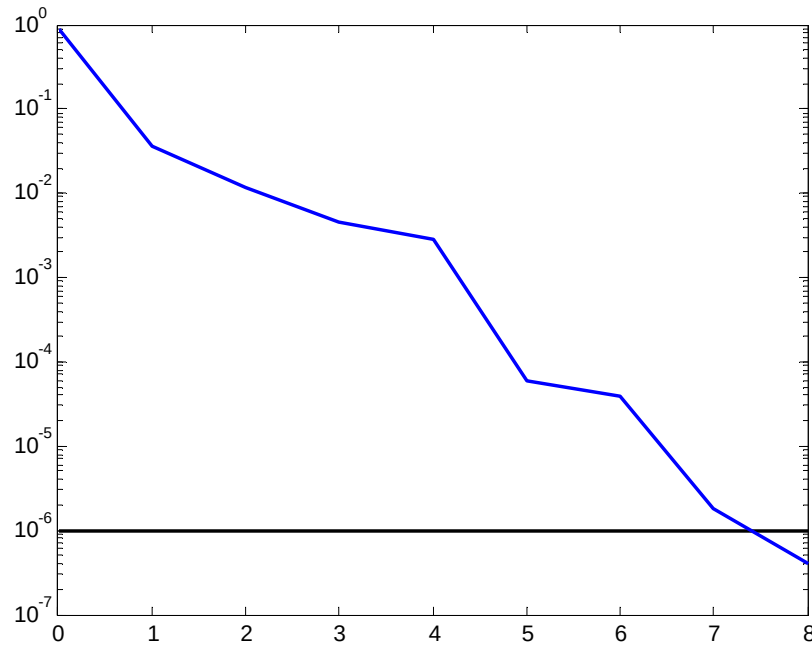


Figure IV.12 : Evolution du processus d'entraînement du nouveau RNA

IV.8.b Test et interprétations

Les résultats obtenus en réalisant le réseau de neurones avec le vecteur d'entrée réduit sont représentés par le tableau IV.12 qui correspond à la phase de test de réponse.

Tableau IV.12 Résultats du test du nouveau réseau de neurones

Type de défaut	Niveau de Charge (%)	CCT IN	CCT RNA 9 variables	CCT RNA 6 variables
CC au nœud n° 1	0,90	0,452	0,451	0,451
	1,00	0,398	0,396	0,395
	1,10	0,377	0,374	0,373
CC au nœud n° 2	0,85	0,297	0,297	0,298
	0,90	0,296	0,296	0,295
	0,95	0,288	0,289	0,289
	1,10	0,195	0,197	0,194
	1,15	0,238	0,239	0,236

D'après les résultats obtenus dans le tableau IV.12, une étude comparative des résultats obtenus par intégration numérique avec ceux estimés par le réseau de neurones optimisé, permet de constater que presque tous les résultats, à quelque centième de seconds près, sont équivalents.

Par ailleurs, une bonne optimisation du vecteur d'entrée aux éléments les plus représentatifs du réseau électrique, a permis de garder l'estimation du temps critique d'élimination du défaut relativement similaire par rapport à l'utilisation du vecteur d'entrée initial.

IV.9 Conclusion

Pour connaître les évolutions des variables caractéristiques du problème, leurs interactions ainsi que leurs influences sur les grandeurs étudiées, nous avons appliqué dans ce travail la formalisation conférée par la méthode des plans d'expériences MPE. Elle nous a permis une modélisation sous forme d'équations de l'ensemble des réponses ainsi qu'une classification des paramètres du vecteur d'entrée selon l'effet le plus important. L'introduction du procédé des plans d'expériences a conduit à une entrée de dimension plus réduite en ne tenant compte que des paramètres dominants du système.

Conclusion Générale

L'étude présentée dans ce mémoire porte sur, l'application des réseaux de neurones artificiels pour l'évaluation de la stabilité transitoire des réseaux d'énergie électrique. Nous nous sommes intéressés en particulier à l'optimisation du vecteur d'entrée du RNA par la méthode des plans d'expériences. Comme nous avons pu le constater tout le long de cette étude, l'évaluation de la stabilité transitoire constitue un sujet d'actualité et revet une importance primordiale dans l'exploitation et la planification des réseaux électriques.

Afin d'atteindre cet objectif, nous sommes passés par plusieurs étapes :

Après avoir rappeler les différentes classifications et les définitions des méthodes utilisées dans la littérature pour l'évaluation de la stabilité transitoire des réseaux électriques ainsi que les techniques d'optimisation, nous avons présenté une modélisation du réseau électrique en vue d'étudier le phénomène de stabilité transitoire. Un modèle complet a été développé composé d'un système d'équations différentielles associé à un système d'équations algébriques avec la prise en compte des régulateurs de tension et de vitesse.

Un programme élaboré sous environnement MATLAB permet de résoudre numériquement l'ensemble des équations différentielles et algébriques régissant le fonctionnement du système. Ces programmes testés sur le réseau *IEEE* 3-machines 9-nœuds ont donné ainsi des résultats satisfaisants. L'avantage de la méthode d'intégration numérique est la possibilité d'inclure des modèles détaillés des différents composants du système. En plus, elle fournit des résultats précis sur la stabilité transitoire du réseau électrique. Or, la limitation principale de cette méthode est le temps de calcul important qui ne permet pas d'entreprendre des applications en temps réel.

Cette limitation nous a poussées à appliquer l'approche des réseaux de neurones artificiels pour une évaluation rapide de la stabilité transitoire. La matrice d'apprentissage a été préparée en utilisant la méthode d'intégration numérique issue du chapitre II. Plusieurs topologies sont considérées en changeant le niveau de charge du système. L'application des R.N.A, avec l'algorithme de rétropropagation pour son apprentissage, nous a permis d'avoir une bonne estimation du comportement transitoire du réseau d'énergie électrique. Dans cette étude, nous avons montré l'intérêt d'appliquer les réseaux de neurones artificiels pour l'évaluation de la stabilité transitoire des réseaux d'énergie électriques en temps réel.

Malgré que cette approche nous a donné de très bons résultats, son application pour l'étude de stabilité transitoire des grands réseaux nécessite l'optimisation du vecteur d'entrée. Pour remédier à ce problème, une étude d'optimisation de ce vecteur est proposée afin de choisir les paramètres qui affectent le plus le système.

Dans le dernier chapitre, nous avons présenté l'application de la méthode des plans d'expériences au problème d'optimisation. Nous avons présenté aussi une méthodologie pour mettre en place cette technique sur notre réseau d'étude. L'étude du plan complet et le plan fractionnaire a permis de classer les paramètres du vecteur d'entrée du réseau de neurones suivant leurs degrés de signification. Toutefois l'analyse de la variance nous a permis une définition d'un seuil de rejet adopté pour cette étude. L'introduction de la méthode des plans d'expériences dans ce contexte a conduit à une optimisation du nombre considérable des paramètres du vecteur d'entrées, tout en maintenant les résultats relativement similaires.

Nous pourrions recommander comme suite de ce travail, entre autres, d'appliquer cette technique pour les grands réseaux électriques, de compléter l'étude en utilisant les autres procédés offerts par la méthode des plans d'expérience, de développer des modèles dynamiques des systèmes de puissance avec les dispositifs stabilisateurs et les organes de régulation.

Bibliographie

- [1] C. Corroyer et P. Duveau, "Protection des réseaux de transport et de répartition", Techniques de l'Ingénieur, traité Génie électrique D4 805.
- [2] P. Kundur, "Power System Stability and Control", McGraw-Hill Inc, 1993.
- [3] M. Pavella et P.G.Murthy, "Transient Stability of Power Systems: theory and practice", Library of congress cataloguing in publication, 1994.
- [4] A. Abur et A. Exposito, "Power System State Estimation: Theory and Implementation", Marcel-Dekker Inc, 2004.
- [5] P. Kundur, J. Paserba, V. Ajjarapu, G. Andersson, A. Bose, C. Canizares, N. Hatziaargyriou, D. Hill, A. Stankovic, C. Taylor, T. Van Cutsem, V. Vittal, "Definition And Classification Of Power System", IEEE\CIGRE Transactions on Power Systems, Vol. 19, pp. 1387 - 1401, 2004.
- [6] M. Crapp, "Stabilité et sauvegarde des réseaux d'énergie électrique" Bermes science publication, LAVOISIER, 2003.
- [7] J. P. Clerfeuille, S. Vitet et C. Lebrevelec, "Plan de défense des réseaux contre les incidents majeurs", Techniques de l'Ingénieur, traité Génie électrique D 4807.
- [8] M. El Hawary et J. Momoh, "Electric Systems, Dynamics, and Stability with Artificial Intelligence Applications", Marcel Dekker 2000.
- [9] A. J. Wood et B.F. Wollenberg "Power generation, operation and control", Quinn-Woodbine, New York, 1983.
- [10] E. G.Shahraki, "Apport de l'UPFC à l'amélioration de la stabilité transitoire des réseaux électriques", Thèse de doctorat, université de Nancy, 2003.
- [11] N. Kandil, "Algorithmes pour accélérer la simulation en stabilité transitoire", Thèse de doctorat, université de MONTREAL, 1999.
- [12] Y. Gu, Y. Zhang, B. Zhang, H.i Hashimoto et H. Taoka, "A Novel Approach for On-line Transient Stability Assessment", IEEE, International Conference on Power System Technology, vol.1, pp 281 – 285, Dec. 2000.

- [13] M. A. Pai, "Power system stability analysis by the direct method of Lyapunov", North Holland Publishing Company, 1982.
- [14] H. Sakaguchi, A. Ishigame et S. Suzuki "Transient Stability Assessment For Power System Via Lur'e Type Lyapunov Function", IEEE, Conference and Exposition Power Systems, vol. 1, 10-13 pp. 227 - 232 Oct. 2004.
- [15] R. M. Parizeau, "Réseaux de neurones" Université Laval, Automne 2004.
- [16] F. Aboytes et R. Ramirez "Transient Stability Assessment In Longitudinal Power Systems Using Artificial Neural Networks", IEEE, Transaction on Power Systems, Vol. 11 No. 4, pp. 2003-2010, November 1996.
- [17] S.K. Tso, X.P. Gu, Q.Y. Zeng, K.L. Lo et W.Q. Zhang, "A Hybrid Framework of Short-Duration Simulation and ANN-Based Transient Stability Assessment for Contingency Screening", IEEE, International Conference on Power System Technology, vol.2, pp. 1315-1319, Aug 1998.
- [18] B. Bonvini, S. Massucco, A. Ivlorini et T. Siewierski, "A Comparative Analysis of Power System Transient Stability Assessment by Direct and Hybrid Methods", IEEE, 8th Mediterranean Electrotechnical Conference, vol.3, pp. 1575-1579, May 1996.
- [19] A. Ladjici, "Calcul évolutionnaire Application sur l'optimisation de la planification de la puissance réactive", Mémoire de magistère, école nationale polytechniques, Algérie, 2005.
- [20] O. Roudenko, "Application des algorithmes évolutionnaire aux problèmes d'optimisation Multi-objectif avec contraintes", Thèse de doctorat en Mathématique, École Polytechnique, France, 2004.
- [21] J. Goupy, "Les plans d'expériences", Tutoriel Numéro 34, Revue MODULAD, 2006.
- [22] "Guide for Synchronous Generator Modeling Practices and Applications in Power System Stability Analyses", IEEE, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, USA, 2003. pp. 1 - 72
- [23] A. Von-Meier, "Electric Power Systems - A Conceptual Introduction" A John Wiley & Sons, Inc, Publication IEEE Press Wiley-Interscience, 2006.

- [24] H. Wayne Beaty, “Handbook of Electric Power Calculations”, Third Edition MCGRAW-HILL, 2001.
- [25] B. Boussahoua, “Evaluation de la stabilité transitoire des réseaux d’énergie électrique par les méthodes énergétiques”, Mémoire de magistère, école nationale polytechniques, Algérie, 2004.
- [26] P. Bornard et M. Pavard, “Réseaux d’interconnexion et de transport : réglage et fonctionnement”, Techniques d’Ingénieur, D 4090.
- [27] A. Besançon-Voda et S. Gentil, “Régulateurs PID analogiques et numériques”, Techniques d’Ingénieur, R7416.
- [28] Technical Manual TM 5-811-14, “Coordinated Power Systems Protection”, Headquarters, Department Of The United States Army, 1991.
- [29] C. Touzet, “Les Réseaux de Neurones Artificiels, Introduction au Connexionnisme”, Cours exercices et travaux pratiques, université de Provence, France. Juillet 1992.
- [30] A.M. Ibrahim, “Fuzzy Logic for Embedded Systems Application”, Elsevier Science USA, 2004.
- [31] F. Sorin, L. Broussard et P. Roblin, “Régulation d’un processus industriel par réseaux de neurones”, Techniques de l’Ingénieur, S 7582.
- [32] N. Amjady, “Transient Stability Assessment By A New Artificial Neural Network”, IEEE, Power Engineering Society Winter Meeting, vol.2, pp. 1315-1319 Jan. 2000.
- [33] K. Wong, W. Lim et N. Phuoc, “Neural Network Transient Stability Assessment Of A Single Machine System Under Asymmetrical Fault Condition”, IEEE, pp. 572-577, 1991.
- [34] S. Krishna et K.R. Padiyar, “Transient Stability Assessment using Artificial Neural Networks”, IEEE, International Conference on Industrial Technology, vol. 2, pp. 627 – 632, Jan. 2000.
- [35] X. P. Gu, S. K. Tso et Q. Zhang, “Combination of Rough Set Theory and Artificial Neural Networks for Transient Stability Assessment”, IEEE, International Conference on Power System Technolog, vol. 1, pp. 19 - 24, Dec. 2000.

- [36] W. S. Sarle, “Neural Networks and Statistical Models”, Proceedings of the Nineteenth Annual SAS Users Group International Conference, USA, 1994.
- [37] A. Del Angel, M. Glavic et L. Wehenkel, “Using Artificial Neural Networks to Estimate Rotor Angles and Speeds from Pharos Measurements”, University of Liège. Department of Electrical Engineering and Computer Science.
- [38] K. K. Sanyal, “Transient Stability Assessment Using Artificial Neural Network”, IEEE, International Conference on Electric Utility Deregulation, Hong Kong, Vol. 2, pp. 633-637, April 2004.
- [39] J. Sobajic et Y. Fellow, “Artificial Neural-net Based Dynamic Security Assessment for Electric Power Systems”, IEEE, Transactions on Power Systems, Vol. 4, pp. 220 – 228, Feb. 1989.
- [40] P. Chapouille, “Planification Et Analyse Des Expériences”, Masson et C^{IE}, Paris. 1973.
- [41] J. Goupy, “plans d’expériences pour surfaces de réponse”, Edition Dunod, Paris, 1999.
- [42] S. Vivier, “Stratégies d’optimisation par la méthode des plans d’expériences et Application aux dispositifs électrotechniques, modélisés par éléments finis”, Thèse de doctorat, école centrale de Lille, 2002.
- [43] F. Gillon, “Modélisation et optimisation par plans d’expériences d’un moteur à commutations électroniques”, Thèse de doctorat, université de Lille, 1997.
- [44] J. Goupy, “Plans d’expériences les mélanges”, Edition Dunod, Paris, 2000.
- [45] J. Goupy, “Introduction aux plans d'expériences”, Dunod, Paris, 2001.
- [46] J. Goupy, “Pratiquer les Plans d'Expériences”, Dunod, Paris, 2005.
- [47] Pillet Maurice, “Introduction aux Plans d'expériences par la méthode Taguchi”, Les Editions d'organisation, Paris, 1992.

Annexe

A.3. Données des lignes :

Branche	Nœud de départ	Nœud d'arrivée	$B_{sh} (pu)$	$R_{ser} (pu)$	$X_{ser} (pu)$
1	1	2	0.0580	0.0045	0.0810
2	1	4	0.0000	0.0000	0.0151
3	2	3	0.0062	0.0049	0.0930
4	2	5	0.0000	0.0000	0.0140
5	3	6	0.0000	0.0000	0.0213
6	4	7	0.0027	0.0018	0.0412
7	4	8	0.0018	0.0017	0.0530
8	5	8	0.0017	0.0016	0.0223
9	5	9	0.0025	0.0024	0.0305
10	6	7	0.0010	0.0017	0.0301
11	6	9	0.0015	0.0016	0.0116
12	7	8	0.0062	0.0045	0.0610
13	7	9	0.0058	0.0039	0.0520
14	8	9	0.0061	0.0049	0.0730

Tableau A.2 : Données des lignes du réseau de transport**A.4. Données des générateurs :**

Générateur		1	2	3
Type		Vapeur	Vapeur	Vapeur
S	kVA	192	192	128
V	kV	18.0	18.0	13.8
FP	-	0.85	0.85	0.85
H	pu	6.214	6.214	4.766
x'_d	pu	0.197	0.197	0.25
x_d	pu	0.896	0.896	1.313
x'_q	pu	0.197	0.197	0.25
x_q	pu	0.865	0.865	1.258
T'_{d0}	s	6	6	5.89
T'_{q0}	s	0.535	0.535	0.600

Tableau A.3 : Donnée des générateurs

A.5. Données des transformateurs :

Nœud de départ	Nœud d'arrivée	Rapport (kV)	Réactances (pu)
1	4	14.4/230	0.0151
2	5	14.4/230	0.0213
3	6	14.4/230	0.0133

Tableau A.4 : Données des transformateurs**A.6. Données des régulateurs de tension :**

Générateur		1	2	3
T_e	pu	0.100	0.100	0.100
K_e	pu	50.00	50.00	50.00
E_{xma}	pu	+ 5.00	+ 5.00	+ 5.00
E_{xmi}	pu	- 5.00	- 5.00	- 5.00

Tableau A.5 : Données des régulateurs de tension**A.7. Données des régulateurs de vitesse :**

Générateur		1	2	3
T_v	pu	5.0	5.0	5.0
K_v	pu	0.5	0.5	0.5
σ	pu	0.6	0.6	0.6
P_{mma}	pu	3.00	3.00	1.50
P_{mmi}	pu	0.80	0.80	0.40

Tableau A.6 : Données des régulateurs de vitesse