

SYSTEME EXPERT POUR L'ANALYSE DE SECURITE D'UN RESEAU DE TRANSPORT D'ENERGIE ELECTRIQUE

THESE N° 1089 (1992)

PRESENTEE AU DEPARTEMENT D'ELECTRICITE

ECOLE POLYTECHNIQUE FEDERALE DE LAUSANNE

POUR L'OBTENTION DU GRADE DE DOCTEUR ES SCIENCES TECHNIQUES

PAR

CHRISTIAN TINGUELY

**Ingénieur diplômé EPFL
originaire de Porsel (FR)**

acceptée sur proposition du jury:

**Prof. A. Germond, rapporteur
M. P. Bomard, corapporteur
M. P. Braun, corapporteur
Prof. R. Longchamp, corapporteur**

**Lausanne, EPFL
1992**

Cette thèse est consacrée à l'étude de l'analyse de sécurité en régime permanent d'un réseau électrique. Le problème consiste à identifier rapidement et précisément les contingences qui créent des violations des contraintes thermiques. L'approche proposée est basée sur l'utilisation des techniques d'intelligence artificielle et plus particulièrement les systèmes experts.

Qui dit système expert, dit connaissances. Cette thèse présente différentes approches pour l'acquisition des connaissances. Il est proposé d'exploiter aussi bien des connaissances quantitatives que qualitatives.

Une approche basée sur l'analyse systématique des contingences simples est proposée pour établir une base de connaissances quantitative. La méthode consiste à quantifier l'effet du déclenchement de chaque branche sur les autres branches du réseau. La base de connaissances peut être utilisée de deux manières différentes. D'une part, elle permet d'estimer les transits de puissance dans une branche suite à une contingence simple autour du point de fonctionnement pour lequel elle a été établie. Cette première application peut être également étendue à l'analyse des contingences doubles en considérant les contingences pour lesquelles le principe de superposition peut être appliqué. D'autre part, cette même base de connaissances peut être utilisée pour extraire des règles de manière automatique pour une contingence. Ces règles sont obtenues à partir de l'observation de similarités pour différents points de fonctionnement.

Cette thèse traite également des connaissances acquises auprès des exploitants des réseaux de transport. Les règles sont exprimées en considérant les principaux facteurs qui permettent d'identifier les contingences critiques de manière qualitative. Une approche basée sur l'utilisation de la logique floue est proposée pour traiter ces connaissances.

De plus, ce travail présente une étude des méthodes de classement de contingences par ordre de sévérité. Les performances de ces méthodes sont analysées dans le but de les intégrer au sein d'un système expert.

Les différentes formes de connaissances recueillies ont permis de développer un prototype de système expert. Finalement, les performances de ce prototype ont été évaluées en considérant le réseau de transport suisse d'énergie électrique. L'analyse des résultats indique que l'approche proposée permet d'obtenir un gain de temps important par rapport à une approche classique basée sur l'utilisation d'un calcul de répartition de puissance tout en assurant une précision acceptable des résultats.

This thesis is dedicated to the study of electrical power system security analysis in steady state. The problem consists in identifying quickly and precisely the contingencies which create thermal constraints violations. The suggested approach is based on the use of artificial intelligence techniques and specifically on expert systems.

Who says expert system, says knowledge. This thesis presents different approaches for knowledge acquisition. It is proposed to exploit quantitative as well as qualitative knowledge.

An approach based on the systematic analysis of single contingencies is advanced to establish a quantitative knowledge base. The method consists in quantifying the effect of each branch on the other branches of the power system. The knowledge base can be used in two different ways. On the one hand, it allows the estimation of the power flows in a branch following a single contingency around the working point for which it has been established. This first use could be also extended to the analysis of double contingencies by considering the contingencies for which the superposition principle can be applied. On the other hand, this same knowledge base could be used to automatically extract rules for a contingency. Rules are extracted by considering similarities between the knowledge bases obtained for different characteristic operating states.

This thesis also deals with knowledge obtained by experienced power system operators. The rules are expressed by considering the main factors which allow a qualitative identification of the critical contingencies. An approach based on fuzzy filtering is recommended to process the knowledge.

Furthermore, this work presents a study of contingency ranking methods by order of severity. The methods performances are analyzed with the intention of integrating them within an expert system.

The different knowledge forms collected and developed have allowed the development of an expert system prototype. The prototype performances have been evaluated by considering the Swiss utility system. The proposed approach is greatly time-saving in comparison with a classical approach based on the use of a power flow calculation, while maintaining an acceptable results precision.

Remerciements

Je tiens à exprimer ma reconnaissance au Professeur Alain Germond pour m'avoir permis de réaliser cette thèse dans d'excellentes conditions et avoir accepté de la diriger. Je tiens à remercier Monsieur Bornard, Monsieur Braun et le professeur Longchamp pour avoir participé au jury de thèse ainsi que le professeur Hasler, président du jury d'examen.

Je remercie le fonds suisse de la recherche scientifique et le fonds national pour la recherche énergétique pour avoir financé en partie cette recherche contenue dans le cadre des projets intitulés "Structuration d'un réseau électrique par les méthodes d'intelligence artificielle" (projet FN 2.333-0.86) et "Outil d'aide à la décision pour les centres de conduite" (projet NEFF 482). J'ai particulièrement apprécié la collaboration des entreprises d'électricité, spécialement l'Energie de l'Ouest-Suisse (EOS), Bernische Kraftwerke AG (BKW) et Aare-Tessin AG (ATEL).

Mes remerciements vont également à mes collègues de travail et amis, pour le soutien, l'intérêt qu'ils ont manifestés et la sympathique ambiance de travail. Je pense en particulier à Nell Reimann, au Dr Pierre-André Chamorel et au Dr Rachid Cherkaoui. J'aimerais souligner plus particulièrement la collaboration, les innombrables et fructueuses discussions scientifiques que j'ai eues avec mon collègue de bureau Alain Bart.

J'adresse une pensée affectueuse à Sandra qui m'a apporté un inestimable soutien moral au cours de ce travail. Je ne terminerai pas sans associer à mes remerciements mes amis et toute ma famille pour leur soutien constant. Que cette thèse soit un témoignage de ma gratitude et de ma reconnaissance envers mes parents qui m'ont encouragé à faire des études.

Table des matières

Chapitre 1 : Introduction	1
----------------------------------	----------

1.1. Analyse de sécurité en régime permanent	2
1.1.1. Définition de la notion de sécurité.....	2
1.1.2. Classification du mode de fonctionnement du réseau.....	2
1.1.3. Analyse des contraintes de sécurité à respecter	4
1.2. Techniques de calcul des contingences.....	6
1.2.1. Les techniques rapides de calcul des contingences (screening methods).....	8
1.2.2. Les techniques de sélection automatique des contingences (ranking methods)	9
1.2.3. Techniques de reconnaissance de formes (pattern recognition).....	10
1.2.4. Les techniques d'intelligence artificielle et plus particulièrement les systèmes experts (expert systems).....	11
1.2.5. Synthèse de la bibliographie	13
1.3. Contribution de cette thèse.....	13
1.4. Plan de la thèse	14

Chapitre 2 : De la notion d'intelligence artificielle à la définition d'un système expert pour l'analyse de sécurité	17
---	-----------

2.1. Réflexions sur la notion d'intelligence artificielle.....	17
2.1.1. Origines et histoire de l'intelligence artificielle	18
2.1.2. Définition de la notion d'intelligence artificielle.....	19
2.2. Les systèmes experts.....	20
2.2.1. Définition d'un système expert.....	20
2.2.2. Constituants d'un système expert.....	21
2.3. Représentation des connaissances	22
2.3.1. Les règles de production.....	23
2.3.2. Structure d'objets	25
2.3.3. La logique formelle.....	27
2.3.4. La logique à plusieurs valeurs.....	28

2.3.5. Les procédures.....	29
2.3.6. Les heuristiques.....	29
2.4. Mécanismes d'inférences.....	30
2.4.1. Le chaînage avant.....	31
2.4.2. Le chaînage arrière.....	32
2.4.3. Le chaînage mixte.....	32
2.4.4. L'orientation de la recherche.....	33
2.5. Approche proposée pour l'analyse de sécurité.....	35
2.5.1. Pourquoi utiliser un système expert plutôt qu'un expert ?.....	35
2.5.2. Architecture du système expert.....	36
2.6. Conclusion.....	38
<hr/>	
Chapitre 3 : Création et exploitation d'une base de connaissances quantitatives	41
<hr/>	
3.1. Calcul de répartition de puissance dans un réseau.....	41
3.1.1. Formulation mathématique.....	42
3.1.2. Résolution du système d'équations.....	44
3.2. Acquisition de connaissances.....	44
3.2.1. Constitution de la base de connaissances.....	45
3.3. Exploitation de la base de connaissances.....	46
3.3.1. Sélection des coefficients d'influence de courant.....	47
3.3.2. Evaluation des contingences simples.....	48
3.3.3. Evaluation des contingences doubles.....	49
3.4. Mise en oeuvre de l'approche proposée.....	50
3.4.1. Analyse de sécurité n-1 avec modification des charges et productions.....	51
3.4.2. Analyse de sécurité n-2 au point de fonctionnement pour lequel la base de connaissances a été établie.....	52
3.5. Extraction des règles.....	52
3.5.1. Mesure de similitude des coefficients d'influence de courant.....	53
3.5.2. Prétraitement des coefficients d'influence de courant.....	54
3.5.3. Interprétation des coefficients d'intercorrélation pour extraire des règles.....	55
3.6. Utilisation des règles.....	57
3.6.1. Application des règles.....	58
3.7. Conclusion.....	66

Chapitre 4 : Classement des contingences par ordre de sévérité 69

4.1. Théorie des méthodes de classement des contingences.....	69
4.2. Evaluation des performances des méthodes de classement des contingences.....	70
4.2.1. Evaluation de l'efficacité d'une méthode par voie graphique	71
4.2.2. Evaluation de l'efficacité d'une méthode par voie numérique	73
4.3. Paramètres propres aux indices de performance.....	74
4.3.1. Facteurs à prendre en considération.....	75
4.3.2. Les indices de performance.....	75
4.3.3. Sélection des paramètres de l'indice de performance	77
4.3.4. Conclusion.....	82
4.4. Méthode de classement des contingences et système expert	83
4.4.1. Méthode des moindres carrés	83
4.4.2. Estimateur des moindres carrés.....	84
4.4.3. Moindres carrés récursifs	85
4.4.4. Mise en oeuvre des moindres carrés récursifs.....	86
4.4.5. Application des moindres carrés récursifs.....	88
4.4.6. Conclusion	89

Chapitre 5 : Acquisition de connaissances qualitatives auprès des experts 91

5.1. Approches utilisées pour l'acquisition de connaissances.....	92
5.2. Considérations générales d'exploitation du réseau	93
5.3. Analyse de la connaissance de l'expert.....	95
5.3.1. Approche basée sur l'utilisation du théorème de Bayes	97
5.3.2. Approche basée sur la théorie de Dempster-Shafer.....	97
5.3.3. Approche basée sur la notion de sous-ensemble flou.....	99
5.4. Sous-ensemble flou.....	100
5.4.1. Opérations sur des sous-ensemble flous.....	102
5.5. Caractéristiques d'une fonction d'appartenance	105
5.5.1. Exemple de constitution d'une fonction d'appartenance.....	106
5.6. Filtrage flou d'une proposition.....	108
5.7. Application à l'analyse de sécurité.....	110
5.7.1. Filtrage flou dans le cas de l'analyse de sécurité.....	111
5.7.2. Niveau d'acceptation d'une règle.....	114
5.8. Intégration de la logique floue dans Nexpert Object.....	114
5.8.1. La classe "sous-ensemble flou"	115
5.8.2. La classe "variable floue"	115

5.9. Application numérique.....	116
5.10. Conclusion	118

Chapitre 6 : Mise en oeuvre et évaluation du système expert	121
--	------------

6.1. Structure de la base de connaissances.....	121
6.1.1. Organisation de la connaissance	121
6.1.2. Structure de la base de faits.....	123
6.1.3. Structure de la base de règles.....	125
6.2. Implantation du système expert	128
6.2.1. Choix d'un outil système expert.....	128
6.2.2. Description de Nexpert Object.....	130
6.2.3. Interface entre Nexpert et le monde extérieur.....	131
6.3. Validation et évaluation des performances du système expert.....	132
6.3.1. Choix des objectifs de validation.....	133
6.3.2. Choix du mode de validation.....	133
6.3.3. Précision des résultats.....	134
6.3.4. Rapidité du système expert	135
6.3.5. Situations utilisées pour valider le système expert.....	136
6.4. Validation et évaluation du système expert pour l'analyse de sécurité n-1.....	137
6.4.1. Commentaires	140
6.5. Validation et évaluation du système expert pour l'analyse de sécurité n-2.....	141
6.5.1. Commentaires	142
6.6. Conclusion	143

Chapitre 7 : Conclusion	147
--------------------------------	------------

7.1. Directions de recherches futures.....	149
--	-----

Bibliographie	151
----------------------------	------------

Annexe A : Moindres carrés récursifs	159
---	------------

Annexe B : Mesure d'intersection pour une fonction d'appartenance trapézoïdale	161
---	------------

Annexe C : Schéma du réseau (chapitre 6)	163
---	------------

Annexe D : Schéma du réseau (chapitre 5)	167
---	------------

Curriculum Vitae	171
-------------------------------	------------

Chapitre 1

Introduction

La responsabilité majeure des exploitants d'un réseau électrique est de fournir sans interruption de l'électricité de grande qualité aux consommateurs. Tension, fréquence, fiabilité sont les principaux facteurs qui spécifient la qualité de l'énergie électrique, sans oublier de considérer les exigences économiques. Le rôle du contrôle de sécurité est d'augmenter la fiabilité du transport de l'électricité en parvenant à limiter les conséquences et la durée des déclenchements.

L'objectif de l'analyse de sécurité en régime permanent est de déterminer les transits de puissance et les tensions aux noeuds suite à des événements tels que :

- Déclenchement de lignes.
- Déclenchement de transformateurs.
- Déclenchement de générateurs.

Les déclenchements de lignes et de transformateurs surviennent pour différentes raisons, dont la plus courante survient lors d'une maintenance planifiée. Par exemple, des manoeuvres pour le contrôle des transits de puissance peuvent nécessiter une mise hors service de lignes. Il existe également des déclenchements forcés: une ligne ou un transformateur qui présente un dépassement de transit est automatiquement isolé du réseau par le fonctionnement des disjoncteurs de manière à protéger les équipements de tout dommage.

L'opérateur du réseau doit connaître les effets de tous les déclenchements, planifiés ou forcés, sur les transits de puissance et les tensions dans le réseau. Pour un déclenchement de maintenance pour le réseau, il est nécessaire d'effectuer un calcul de répartition de puissance avant de procéder à celui-ci. La situation se complique généralement lors de déclenchements forcés. Ceux-ci surviennent généralement avec une faible probabilité et ils sont fortement dépendants de l'heure et des conditions atmosphériques. Habituellement, le déclenchement d'une seule branche du réseau est plus probable que le déclenchement simultané de deux branches. Pour cette raison, les exploitants utilisent un critère N-1 pour l'analyse de sécurité. Ce critère correspond à assurer un fonctionnement normal du réseau pour un déclenchement quelconque d'une branche du réseau.

1.1. Analyse de sécurité en régime permanent

Le propos de ce paragraphe est de définir le concept de sécurité en régime permanent et plus particulièrement de présenter la stratégie de contrôle utilisée au sein d'un centre de conduite d'un réseau électrique.

1.1.1. Définition de la notion de sécurité

La sécurité d'un réseau d'énergie électrique en régime stationnaire est une fonction déterministe, dépendante du temps et des conditions instantanées d'exploitation. Différentes définitions sont proposées dans les publications scientifiques :

- La sécurité d'un réseau électrique est la capacité du système à fonctionner normalement malgré des accidents non planifiés des équipements, appelés contingences [Chr88].
- La sécurité d'un réseau électrique est la capacité du réseau et de ses équipements à supporter des perturbations surgissant sous la forme de déclenchements d'équipements. L'analyse de sécurité est l'activité où cette capacité est examinée [San86].
- La sécurité d'un réseau électrique est généralement jugée en termes de capacité du réseau à supporter l'impact de changements non prévisibles dûs à la perte de lignes de transmission, transformateurs ou générateurs [Ver87].

L'analyse de sécurité en régime permanent d'un réseau électrique a pour objectif de définir le degré de sécurité du réseau, c'est-à-dire établir le nombre X de défaillances d'éléments du réseau (pour n'importe quelle combinaison de n éléments défaillants) que le réseau peut supporter sans violation de contraintes. Il convient de relever la nature combinatoire du problème. En effet, pour un réseau comprenant N branches, il est nécessaire d'effectuer N calculs de répartition de puissance pour une analyse de sécurité $N-1$. Dans le cas de l'analyse de sécurité $N-2$, il est nécessaire de déterminer les conséquences de $N(N-1)/2$ déclenchements. Pour de grands réseaux et pour une analyse des contingences doubles, le temps de calcul à l'aide d'une approche basée sur un calcul systématique de répartition de puissance devient rapidement démesuré en considérant la contrainte d'une évaluation en temps réel de la sécurité du réseau.

1.1.2. Classification du mode de fonctionnement du réseau

Un système comprenant un réseau de transport et des centrales de production peut comprendre quatre modes ou états de fonctionnement. Ces états sont désignés comme suit :

- Etat normal ou préventif.
- Etat d'alerte.
- Etat d'urgence.
- Etat de restauration.

L'état d'alerte a été proposé par Cihlar [Cih69] suite à l'article de Dy Liacco [Dy67]. La figure 1.1 ci-dessous présente les différents modes de fonctionnement d'un réseau électrique.

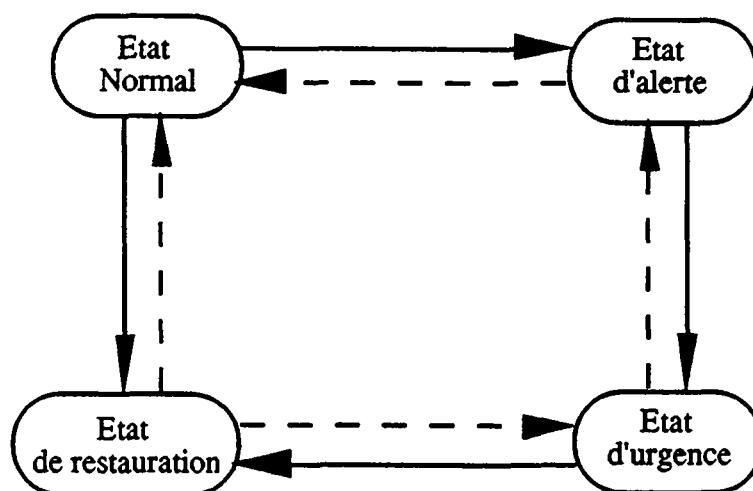


Figure 1.1: Les états de fonctionnement d'un réseau électrique

Les flèches en traits continus indiquent les transitions possibles du réseau. Les flèches en traits discontinus indiquent la transition d'un état du réseau à un autre à l'aide d'actions générées par l'opérateur du réseau.

Etat normal ou préventif

L'état normal de fonctionnement est aussi appelé état préventif. Dans l'état normal, le système générateur-transmission fonctionne de manière à ce que les demandes de tous les consommateurs soient satisfaites à la fréquence standard, aux niveaux de tension de fonctionnement et sans violation de contraintes thermiques. L'objectif du contrôle dans l'état préventif est de subvenir à la satisfaction de la demande des consommateurs et à un coût minimum. Comme l'approvisionnement continu en électricité est nécessaire, aucun composant électrique du système ne doit être exploité en dessus de sa limite thermique. D'autre part, le système électrique ne doit pas devenir instable lors de perturbations mineures. L'action de contrôle est de nature préventive, c'est-à-dire que le système de contrôle doit reconnaître les changements d'état du réseau électrique et des conditions d'exploitation. Il doit également évaluer les effets d'incertitudes et adopter une ligne de conduite pour prévenir, de manière aussi économique que possible, les détériorations qui peuvent survenir.

Etat d'alerte

L'état d'alerte est caractérisé par un mode de fonctionnement où il existe une ou un ensemble de perturbations entraînant la violation de contraintes dans le réseau, c'est-à-dire l'apparition de tensions trop hautes ou trop basses, de surcharges de courant. Cependant, le système peut fonctionner dans cet état pendant un temps limité.

Etat d'urgence

L'état d'urgence survient lorsque:

- Certaines valeurs limites sont atteintes.
- La tension d'un consommateur ne peut pas être maintenue à son minimum autorisé.
- La fréquence du système commence à diminuer.
- Le système électrique perd son synchronisme.

L'objectif de contrôle dans l'état d'urgence consiste à venir en aide au réseau et empêcher des dégradations plus importantes, tout en satisfaisant au maximum la demande des consommateurs. Les considérations économiques deviennent secondaires.

Etat de restauration

L'état de restauration est l'état du réseau où il n'est plus possible de subvenir à la demande de tous les consommateurs. Généralement, il fait suite à un état d'urgence. L'objectif de contrôle est de passer d'une situation où la consommation est partiellement satisfaite à une situation où tous les consommateurs seraient satisfaits et ceci dans un minimum de temps. Du point de vue de la satisfaction des consommateurs, la restauration de l'alimentation interrompue dans un laps de temps aussi bref que possible est d'une importance cruciale.

1.1.3. Analyse des contraintes de sécurité à respecter

Chacun des quatre états de fonctionnement d'un réseau électrique est déterminé en considérant le respect ou non des contraintes de sécurité. Ces contraintes peuvent être exprimées sous la forme d'égalités et d'inégalités.

Contraintes d'égalité

La somme des productions doit être égale à la somme des consommations. Les bilans de puissance active et réactive sont considérés séparément.

Bilan de puissance active :

$$\sum_{j=1}^n P_{Gj} - \sum_{i=1}^m P_{Li} - \sum \text{pertes actives} = 0$$

m : Nombre de noeuds consommateurs.

n : Nombre de noeuds générateurs.

P_{Gj} : Production de puissance active injectée au noeud j .

P_{Li} : Consommation de puissance active au noeud i .

Bilan de puissance réactive :

$$\sum_{j=1}^n Q_{Gj} - \sum_{i=1}^m Q_{Li} - \Sigma \text{ pertes réactives} = 0$$

m : Nombre de noeuds consommateurs.

n : Nombre de noeuds générateurs.

Q_{Gj} : Production de puissance réactive injectée au noeud j .

Q_{Li} : Consommation de puissance réactive au noeud i .

Contraintes d'inégalité

Ces contraintes d'inégalité touchent plus particulièrement les éléments constituant le réseau de transport. Ce réseau est modélisé en considérant les éléments suivants :

- Générateurs
- Charges
- Lignes
- Transformateurs

Chacun de ces éléments est soumis principalement à des contraintes de nature thermique.

Générateurs

D'un point de vue statique, les générateurs doivent respecter les limites de puissance active et réactive aussi bien que les tensions prescrites pour chaque générateur.

Puissance active maximale à la sortie du générateur i :

$$P_{Gi} < P_{Gimax}$$

Puissance réactive maximale à la sortie du générateur i :

$$Q_{Gimin} < Q_{Gi} < Q_{Gimax}$$

La tension du générateur doit être considérée comme une constante si le générateur a un régulateur en boucle fermée. Ce régulateur peut avoir une tension comprise entre les bornes suivantes :

$$V_{Gimin} < V_{Gi} < V_{Gimax}$$

P_{Gimax} , Q_{Gimax} : Limites pour les puissances actives et réactives produites par le générateur i .

V_{Gimin} , V_{Gimax} : Limites pour les tensions du générateur i .

Lignes

Pour les lignes, la nature des contraintes est uniquement de nature thermique.

$$I_{ij} < I_{ijmax}$$

I_{ij} : Courant dans la ligne ij.

I_{ijmax} : Limite thermique admissible dans la ligne ij.

Charges

La limitation principale est la tension au noeud i où la charge est connectée :

$$V_{imin} < V_i < V_{imax}$$

V_i : Tension au noeud i.

V_{imin} , V_{imax} : Tension minimale et maximale admissibles au noeud i.

Transformateurs

Pour les transformateurs, les limites sont aussi bien liées à la nature thermique (puissance apparente admissible maximale) que liées au respect des niveaux de tension primaire et secondaire du transformateur.

$$S < S_{max} \quad S_{max} \text{ est la puissance apparente maximale du transformateur.}$$

$$U_{1min} < U_1 < U_{1max}$$

$$U_{2min} < U_2 < U_{2max}$$

La tension U_1 au primaire du transformateur doit être inférieure à la valeur maximale U_{1max} et supérieure à la valeur U_{1min} . La tension U_2 au secondaire doit être inférieure à U_{2max} et supérieure à U_{2min} .

1.2. Techniques de calcul des contingences

Le domaine de l'analyse de sécurité des réseaux électriques est un secteur de recherche en pleine expansion comme en témoigne la publication régulière d'articles traitant du sujet dans des revues scientifiques. Le propos de cette section est de présenter un aperçu des différentes approches étudiées jusqu'alors sans pour autant être exhaustif en la matière. L'étude des articles traitant de l'analyse de sécurité permet de regrouper les différentes techniques en quatre groupes distincts :

- Les techniques rapides de calcul des contingences ou méthodes implicites (screening methods).

- Les techniques de sélection automatique des contingences (ranking methods).
- Les techniques de reconnaissance de formes (pattern recognition).
- Les techniques d'intelligence artificielle et plus particulièrement les systèmes experts (expert systems).

Toutes ces différentes techniques cherchent à déterminer les contingences critiques sans procéder à une analyse systématique et complète des différentes contingences à l'aide d'un calcul complet de répartition de puissance. Les deux exigences fondamentales à satisfaire pour une méthode d'analyse de contingences en temps réel sont :

- Temps de calcul réduit en comparaison d'une analyse systématique des contingences à l'aide d'un calcul complet de répartition de puissance.
- Précision de la méthode.

La figure 1.2 ci-dessous présente la répartition des principales publications dans les quatre groupes énoncés ci-dessus. Les différentes publications citées dans la figure 1.2 présentent une approche pour traiter les contingences qui créent des violations des contraintes thermiques. La liste proposée n'est bien entendu pas exhaustive. D'autres articles sont cités en référence pour l'identification des contingences qui créent des violations des contraintes de tension. De manière générale, une majorité des approches proposées est associée aux méthodes de classement de contingences par ordre de sévérité.

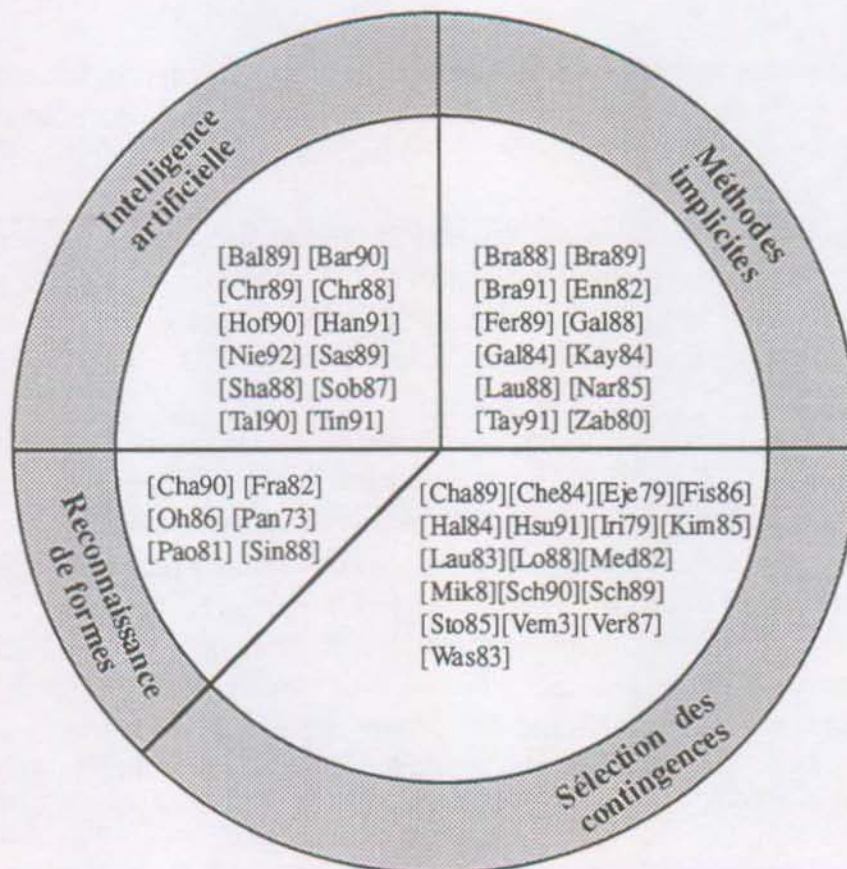


Figure 1.2: Répartition des publications scientifiques

Le but des sections suivantes est de présenter de manière non exhaustive l'originalité, la diversité et l'évolution de quelques approches citées dans la figure 1.2.

1.2.1. Les techniques rapides de calcul des contingences (screening methods)

Ces techniques regroupent les méthodes qui calculent avec des approximations la répartition des puissances actives et réactives suite à une contingence. A l'origine, pour obtenir une vitesse raisonnable de calcul, ces méthodes utilisaient une solution approximée [Enn82],[Nar85] ou partielle de la solution du système [Lau88], [Lau83],[Zab80]. Récemment, des méthodes ont été développées pour choisir et résoudre uniquement la partie du réseau qui se trouve sous stress [Gal84], [Bra88].

L'identification des puissances actives, sans la limitation d'un calcul de répartition de puissance en continu, a été abordée avec succès par Galiana [Gal84] et Brandwajn [Bra88]. Les deux articles présentent le même concept: choisir un nombre de branches dangereuses et résoudre la portion du réseau nécessaire pour évaluer les échanges réels de puissance sur ces branches.

Une des méthodes les plus récentes est proposée par Brandwajn [Bra89]. Elle vise à résoudre uniquement la portion du réseau affectée par la contingence. Cette méthode a les caractéristiques suivantes :

- L'analyse est effectuée en utilisant les propriétés de la factorisation LU des matrices à facteurs réels.
- Les changements temporaires de la topologie du réseau, tels que les déclenchements de branches, sont simulés à l'aide des méthodes de compensation. Pour des changements plus complexes, les méthodes rapides de refactorisation partielle sont utilisées .
- Pour chaque contingence, l'algorithme choisit automatiquement une frontière qui établit un sous-réseau contenant tous les changements de topologie causés par la contingence. Pour chaque contingence, les branches sont divisées en deux groupes: les contingences potentiellement vulnérables et celles qui ne le sont pas.

Lauby [Lau88], [Lau83] propose une approche basée sur le classement des contingences par ordre de sévérité, mais il utilise la résolution partielle du système pour l'analyse des contingences potentiellement critiques. Dans beaucoup de cas, si une contingence cause une surcharge, celle-ci est adjacente à la contingence. Lors du calcul de répartition de puissance à l'aide de Gauss Seidel, les noeuds voisins du déclenchement sont mis à jour, alors que les noeuds éloignés sont considérés comme ayant une tension constante. Les noeuds proches de la contingence constituent un sous-réseau. Pour modéliser les transits à la frontière du sous-réseau, les transits sont considérés comme des charges constantes. Les branches au-delà de la frontière du sous-réseau sont enlevées et les admittances des noeuds frontières sont modifiées. Ensuite, un calcul de répartition de puissance, selon un modèle linéarisé, peut être effectué pour le sous-réseau.

Garvizu [Gar87] propose l'utilisation de la formule de Woodbury pour le calcul du Jacobien suite à une modification de topologie du réseau.

1.2.2. Les techniques de sélection automatique des contingences (ranking methods)

Les techniques de sélection automatique des contingences (ranking methods) quantifient la sévérité de chaque déclenchement à l'aide d'un indice de performance. Cet indice mesure le stress sous lequel le réseau se trouve [Eje79], [Iri79], [Mik81]. Suite au calcul des indices de performances pour chacune des contingences, celles-ci peuvent être analysées en commençant par les plus sévères et en parcourant la liste jusqu'aux contingences les moins sévères.

Des techniques ont été proposées pour éliminer les erreurs de masquage provenant de l'utilisation des indices de performance [Hal84]. Les effets de masquage apparaissent lorsqu'une contingence comportant plusieurs branches proches de la limite thermique est classée au même rang qu'une contingence ayant une seule branche surchargée. Malgré toutes ces améliorations, le problème du classement des contingences selon leur ordre de sévérité n'est que partiellement résolu.

Ejebe [Eje79] propose une méthode pour classer les déclenchements selon leur sévérité et leurs effets sur les transits de puissance ou le profil des tensions. La méthode développée utilise le théorème de Tellegen [Boi78] pour déterminer les sensibilités d'un système d'indices de performance en respectant les déclenchements. Le classement des contingences est effectué en ordonnant les sensibilités normalisées de la plus grande à la plus petite. La méthode n'indique pas de manière explicite si la contingence conduit à créer des problèmes de tension ou de surcharge, mais elle indique la sévérité de chaque contingence face aux autres. Un calcul de répartition complet est effectué pour les contingences en parcourant la liste classée des indices de performance. Différents critères d'arrêts peuvent être envisagés. Le premier consiste à arrêter l'analyse lorsque plus aucune surcharge n'est identifiée; un autre critère possible consiste à continuer le processus d'analyse jusqu'à ce qu'un nombre arbitraire de contingences successives n'aient pas conduit à identifier une contingence active. Finalement, le dernier critère envisageable est de se limiter à l'analyse des N premières contingences les plus sévères.

Mikolinnas [Mik81] propose une expression exacte pour les modifications des indices de performance. Cette expression comprend tous les termes du développement en série de Taylor des changements de l'indice de performance au lieu de considérer uniquement les termes linéaires. C'est une amélioration de l'algorithme proposé par [Eje79].

Medicherla [Med82] propose un nouvel indice de performance défini comme la charge totale nécessaire à soustraire aux noeuds du réseau de manière à atteindre les niveaux de tension qui existaient avant la contingence. La charge à diminuer peut être considérée comme une mesure de la sévérité de la contingence. Cette mesure peut être utilisée pour comparer la sévérité d'une contingence à une autre.

Wasley [Was83] définit une région de sécurité normalisée à partir des différentes limites (inférieures et supérieures) pour les limites thermiques des branches et les tensions des noeuds.

La zone de sécurité constitue un hyper-espace. Un point en dehors de cet hyper-espace est interprété comme une contingence non sûre. Un indice de performance normalisé est utilisé pour déterminer la distance de la solution au centre de l'hyper-espace. Une distinction entre les limites à court et à long terme est également proposée.

Verstege [Ver87] propose d'utiliser la situation propre au temps réel, c'est-à-dire les résultats spécifiques à l'analyse de sécurité. Entre deux cycles d'analyse, il est possible d'apprendre à partir de l'analyse précédente sans avoir à faire face à de sévères contraintes de temps. La procédure proposée a pour but d'évaluer les indices de performance appropriés et de les mettre à jour à partir de résultats obtenus au cycle précédent. La méthode se base sur l'hypothèse que la topologie et les conditions de charge du réseau ne changent pas totalement à l'intérieur d'un cycle d'étude. Les contingences qui se trouvent dans la liste classée en dessus du critère d'arrêt sont simulées.

Hsu [Hsu92] introduit la logique floue de manière à traduire l'aspect subjectif associé à chacune des contingences par l'opérateur du réseau. L'aspect subjectif est introduit sous la forme du poids associé à chaque contingence.

1.2.3. Techniques de reconnaissance de formes (pattern recognition)

Ces techniques de reconnaissance de formes appliquées à l'analyse de sécurité ont été principalement traitées par [Pan73, Oh86]. Ces méthodes sont basées sur la comparaison de l'état du réseau temps réel (état cible) avec un grand nombre de cas pré-étudiés du réseau (l'ensemble d'entraînement). Une fois l'état le plus proche identifié à l'aide d'une fonction de décision, il est possible de déterminer si l'état actuel du réseau est sûr ou non et même de déterminer les conséquences de déclenchements opérés sur le réseau.

Pang [Pan73] propose une méthode de reconnaissance de formes basée sur la création d'un ensemble d'entraînement. Idéalement, chaque état concevable du réseau doit se trouver dans l'ensemble des vecteurs d'apprentissage. Les différents vecteurs représentant les états du réseau peuvent être classés comme sûrs ou non sûrs. Pour constituer les vecteurs, il est nécessaire de considérer un nombre restreint de caractéristiques et de disposer de méthodes systématiques pour choisir les attributs à considérer. Un des critères les plus simples pour ce choix est qu'un attribut doit apporter de l'information supplémentaire. Il est possible de quantifier l'information propre à chaque attribut pour l'ensemble d'entraînement considéré. L'extraction des attributs débute par le calcul de l'information contenue dans tous les attributs envisageables. L'attribut contenant la plus grande mesure d'information est choisi comme le premier attribut. Les coefficients de corrélation sont calculés entre le premier attribut et le reste des attributs potentiels. Les attributs avec un coefficient de corrélation voisin de l'unité sont écartés. Par la suite, le procédé qui a été utilisé pour choisir le premier attribut est répété.

Une fois les attributs choisis, une fonction de sécurité ou de classification doit être choisie. Cette fonction est une fonction linéaire des attributs pondérés. Différentes méthodes d'apprentissage sont proposées. L'une d'elles est la méthode des moindres carrés et une autre la programmation

linéaire. L'algorithme cherche à déterminer les poids qui minimisent le nombre de mauvaises classifications de l'état du réseau.

Oh [Oh86] propose de stocker en mémoire, de manière structurée et appropriée, différentes conditions de fonctionnement du réseau. A chaque situation sont associées les contingences et l'information des surcharges. Cet ensemble d'entraînement et les attributs de sécurité associés sont structurés de manière à déterminer rapidement le degré de sécurité d'un nouvel état du réseau. L'article présente deux techniques qui améliorent la vitesse requise pour une analyse de sécurité en temps réel. Premièrement, l'ensemble d'entraînement est partagé de manière récursive en groupes qui permettent ensuite une recherche arborescente. Deuxièmement, un procédé mémorise les différents cas de l'ensemble d'entraînement à l'aide de mémoires associatives. Pour la reconnaissance d'états, la distance euclidienne est utilisée comme une mesure de similitude entre l'état cible et l'état de l'ensemble d'entraînement. Pour un état de fonctionnement donné, tous les états de l'ensemble d'entraînement voisins de l'état cible sont identifiés. Cette situation correspond à une distance euclidienne inférieure à un seuil. Lorsque différents états sont proches de l'état cible, une interpolation est effectuée entre les différents états. En tout temps, l'ensemble d'entraînement est analysé de manière à éliminer toute information redondante, afin de laisser place à de nouveaux cas présentant de l'intérêt. La recherche hiérarchique utilisée pour retrouver l'état voisin de l'état cible permet d'obtenir des temps de calcul proportionnels au logarithme du nombre total de cas mémorisés.

1.2.4. Les techniques d'intelligence artificielle et plus particulièrement les systèmes experts (expert systems)

L'utilisation des techniques de l'intelligence artificielle et plus particulièrement les systèmes experts constituent un objet d'un intérêt croissant ces dernières années. L'utilisation de systèmes experts est appropriée lorsqu'il n'existe pas de solution algorithmique générale ou lorsque l'algorithme consiste en une énumération avec une exploitation souvent limitée à cause de l'explosion combinatoire. Actuellement, un nombre restreint de chercheurs se sont intéressés à exploiter les systèmes experts pour l'analyse de sécurité [Sob87], [Chr88], [Bal89], [Chr89], [Sas89], [Hof90], [Han91].

Sobajic [Sob87] a publié un des premiers articles qui propose une approche système expert pour l'analyse de sécurité. L'article propose un certain nombre de règles basées sur l'exploitation topologique de la proximité de la contingence. Les règles énoncées peuvent être appliquées à des réseaux arborescents.

Baldwin [Bal89] propose d'utiliser un système expert pour choisir les contingences sévères à analyser. De plus, il propose de trier les résultats obtenus à partir de l'analyse de sécurité pour les présenter à l'opérateur et supprimer ainsi l'information triviale ou qui ne le concerne pas. Parallèlement aux algorithmes communément utilisés pour déterminer les contingences à analyser, des règles peuvent être utilisées pour reconnaître les conditions de fonctionnement actuel du réseau et identifier les problèmes qui peuvent se présenter sur la base de l'expérience

des opérateurs. Quatre différents objets sont considérés pour l'introduction des techniques de systèmes experts.

- Tirer parti de l'expérience de l'opérateur pour un réseau et des conditions d'exploitation spécifiques.
- Identifier les contingences potentiellement sévères sur la base des conditions présentes d'exploitation et de la configuration du réseau.
- Identifier les contingences qu'il n'est pas nécessaire d'étudier, soit parce que les conséquences sont évidentes pour l'opérateur, soit parce qu'aucune action préventive ne peut être entreprise.
- Identifier des groupes de contingences qui ont le même effet, de manière à n'étudier qu'une seule contingence de ce groupe (par exemple deux branches en parallèle avec les mêmes caractéristiques).

Suite à l'analyse d'une contingence, il est nécessaire de présenter à l'opérateur de manière organisée les types et les sévérités des problèmes et les actions correctives possibles. Des règles peuvent être utilisées pour classifier les contingences en termes de degré de sévérité, de la partie du réseau touchée et des types d'actions correctives suggérées.

Christie [Chr89] présente dans l'article un système expert hybride comprenant des règles et des algorithmes numériques. La partie comprenant les règles permet l'exécution des outils numériques en utilisant des heuristiques qui sélectionnent les contingences à analyser. Des règles sont également utilisées pour l'analyse des résultats numériques, pour vérifier la sécurité du réseau et écrire un rapport de sécurité à l'intention de l'opérateur du réseau. Les outils numériques comprennent un calcul de répartition de puissance découplé et un ensemble de facteurs de distribution pour l'analyse des contingences.

Sasaki [Sas89] propose un système expert qui détermine les conditions de fonctionnement du réseau à partir du profil des tensions et de l'écoulement des puissances dans le réseau. A partir de ces indications obtenues à l'aide d'un calcul de répartition de puissance, il indique les actions de contrôle à entreprendre par les opérateurs du réseau. La caractéristique principale du système expert proposé est son implantation. Les différents composants sont décrits à l'aide d'une structure d'objets appartenant à des classes et auxquels il est possible d'associer des propriétés. Les règles de production sont regroupées selon les états possibles du réseau pour obtenir une inférence efficace. Il comprend également des outils numériques conventionnels comme un calcul de répartition de puissance.

Hoffmann [Hof90,Han91] traite le problème de l'intégration d'un système expert pour l'analyse de sécurité dans un centre de conduite. L'analyse des contingences spécifiées par l'opérateur est basée sur l'utilisation de règles qui décrivent des situations spécifiques qui peuvent créer dans le réseau des îlotages, des perturbations de tension ou des surcharges. Les règles de la base de connaissances ont été obtenues à l'aide d'une simulation à l'aide d'un calcul de répartition de

puissance. Le prototype développé a été testé dans un centre de conduite d'une importante compagnie d'électricité en Allemagne.

1.2.5. Synthèse de la bibliographie

L'abondance de publications scientifiques traitant du problème de l'analyse de sécurité au cours de cette dernière décennie confirme le manque de méthodologie générale et satisfaisante pour aborder l'analyse de sécurité.

Les premières méthodes proposées sont basées sur la linéarisation des équations non-linéaires du calcul de répartition de puissance, afin de déterminer les effets d'une contingence ou de choisir les contingences à analyser. Par la suite, des méthodes ont été proposées pour déterminer l'étendue des effets des contingences, et limiter ainsi la portion du réseau pour laquelle il est nécessaire de calculer l'état du réseau suite à la contingence. De nombreux articles proposent de classer les contingences selon leur sévérité à partir d'un nombre restreint d'itérations du calcul de répartition de puissance. La liste ordonnée des contingences contient souvent des erreurs de classement qui sont difficilement évitables. Parallèlement, des techniques de reconnaissance de formes ont été appliquées pour identifier un état préalablement calculé et mémorisé qui corresponde à l'état actuel du réseau considéré. Ces techniques ont souffert des limites de capacité offertes par les ordinateurs à disposition. Actuellement, elles présentent à nouveau de l'intérêt grâce au développement des réseaux de neurones artificiels [Nie92]. Il faut mentionner l'apparition récente des techniques des systèmes experts appliquées au problème de l'analyse de sécurité.

1.3. Contributions de cette thèse

L'étude menée dans le cadre de ce doctorat s'inscrit dans l'optique de l'analyse de sécurité statique d'un réseau électrique et plus particulièrement l'identification des contingences qui créent des violations de contraintes thermiques.

Les contributions originales de la thèse sont les suivantes :

- La proposition d'une méthode pour estimer la charge des branches du réseau suite à une contingence simple ou double. La méthode proposée est basée sur la constitution d'une base de connaissances à partir d'une analyse systématique des contingences simples.
- L'utilisation de la base de connaissances constituée à l'aide d'une analyse systématique des contingences simples pour l'extraction automatique de règles.
- La mise en oeuvre des méthodes de classement de contingences dans le cadre de leur intégration dans un système expert en utilisant l'algorithme des moindres carrés récursifs.

- L'exploitation des connaissances subjectives recueillies auprès des experts en introduisant le concept de sous-ensemble flou. Les connaissances sont exploitées par le système expert à l'aide d'un filtrage flou.
- Un prototype de système expert réalisé pour l'analyse de sécurité en régime permanent d'un réseau électrique. Il exploite les différentes formes de connaissances présentées dans le cadre de cette thèse pour déterminer les contingences qui créent des surcharges dans le réseau.

1.4. Plan de la thèse

Après avoir défini la notion de sécurité statique et analysé les travaux antérieurs proposés dans les publications scientifiques, la thèse traite des sujets suivants :

Le chapitre 2 a pour objet de définir un système expert pour l'analyse de sécurité. Il montre d'abord le lien qui existe entre la notion d'intelligence artificielle et la notion plus particulière de système expert. Il décrit ensuite la structure générale d'un système expert en détaillant les différents constituants et mécanismes de réflexion à disposition d'un système expert. Finalement, le chapitre définit l'architecture d'un système expert appliqué à l'analyse de sécurité.

Le chapitre 3 est consacré à l'acquisition de connaissances quantitatives. Après avoir présenté une modélisation mathématique du problème de répartition de puissance, une méthode est proposée pour l'estimation de la charge des branches suite à une contingence simple ou double. La méthode proposée est basée sur l'exploitation des résultats obtenus suite à une analyse systématique des contingences simples pour un point de fonctionnement du réseau considéré. Le chapitre se termine en présentant une interprétation de la base de connaissances créée. Elle est exploitée pour extraire des règles qualitatives pour chacun des déclenchement. Un cas de charge du réseau de transport Suisse est utilisé pour illustrer la méthode proposée pour l'évaluation de la charge des branches suite à une contingence et l'extraction des règles.

Le chapitre 4 est dédié à la mise en oeuvre des méthodes de classement de contingences dans le cadre d'un système expert. La première partie traite des principes généraux des méthodes de classement des contingences. les facteurs qui influencent les performances des méthodes de classement sont analysés en considérant un cas de charge du réseau électrique. La seconde partie est consacrée à l'analyse des performances d'une méthode qui détermine en temps réel la valeur de l'indice de performance limite lors d'une modification du point de fonctionnement du réseau.

Le chapitre 5 est consacré au traitement de la connaissance acquise auprès des exploitants des réseaux de transport. Il présente les principaux facteurs considérés par les experts pour déterminer les contingences critiques de manière qualitative pour un état de fonctionnement du réseau électrique. Une approche basée sur l'utilisation de la logique floue est proposée pour traiter les règles correspondant à la contingence analysée. Finalement, un exemple illustre

l'utilisation de la logique floue pour la vérification de compatibilité d'une règle avec les conditions courantes d'exploitation du réseau.

Le chapitre 6 présente la mise en oeuvre des connaissances décrites au cours des différents chapitres et plus particulièrement la réalisation du prototype de système expert présenté au chapitre 2. Après avoir présenté la structure de la base de règles et de faits du système expert réalisé, les performances de celui-ci sont analysées en détails en se basant sur les données de quatre régimes de fonctionnement différents pour le réseau électrique considéré.

Finalement, le chapitre 7 fournit un résumé des points essentiels de ce travail de doctorat sous la forme d'une conclusion. Les principaux objectifs de cette thèse sont rappelés et accompagnés d'une discussion qui propose de futurs développements.

Chapitre 2

De la notion d'intelligence artificielle à la définition d'un système expert pour l'analyse de sécurité

Il n'est pas concevable de parler de système expert sans situer le contexte auquel cette notion appartient. Après avoir spécifié le contexte des systèmes experts, ce chapitre examine les modes de représentation des connaissances et les modes de raisonnement associés à un système expert. Le chapitre se termine par la proposition d'une architecture de système expert pour l'analyse de sécurité.

2.1. Réflexions sur la notion d'intelligence artificielle

L'analyse sémantique de l'appellation "intelligence artificielle" est la source de nombreux débats. Le deuxième mot est généralement compris avec le même sens par chacun. Par contre, le premier est porteur de nombreuses ambiguïtés. Dans une acceptation large, il est compris comme la plus noble des compétences de l'homme, c'est-à-dire sa capacité à percevoir et comprendre le monde dans lequel il évolue.

Aujourd'hui, prétendre qu'une machine peut, avec plus ou moins de réussite, se substituer au cerveau humain provoque une atteinte à la part la plus noble de l'homme, sa pensée. L'intelligence a le tort d'arracher à l'homme ce qui doit, à la conscience de tous, le distinguer des animaux. Le problème qui se pose est de savoir si l'intelligence artificielle subtilise à l'homme cette activité qu'est la pensée. La notion d'intelligence artificielle, qui a été largement amplifiée et déformée par les médias ou les spécialistes, est la source de débats idéologiques animés.

L'origine de ces débats peut être associée à la dénomination de cette branche informatique par les chercheurs. Celle-ci peut être critiquable, mais elle existe et il convient de l'accepter comme un produit de l'histoire exprimant non seulement une prétention mais également une ambition difficilement mesurable. Certains ne voient pas de limites au développement de l'ingéniosité humaine. Pour eux, il n'y a pas de raison que les générations futures ne soient pas le berceau de machines qui, fabriquées par des hommes, seraient capables de rivaliser avec eux. D'autres au

contraire, plus réservés, n'admettent pas qu'une réalisation de l'homme puisse rivaliser avec celui-ci, car l'espèce humaine est dotée de qualités exceptionnelles.

Le propos n'est pas de développer les idées sous-jacentes à la notion d'intelligence artificielle, pas plus de nourrir le débat qui agite les deux courants antagonistes exposés ci-dessus. Le paragraphe suivant a pour objet de situer l'intelligence artificielle au sein de la pluridisciplinarité à laquelle elle appartient, en considérant les origines et l'histoire de cette discipline.

2.1.1. Origines et histoire de l'intelligence artificielle

L'idée de réaliser des machines intelligentes remonte à l'Antiquité. Dans l'Iliade, selon la légende racontée, Héphaïstos, dieu du feu, avait construit des tables à trois pieds munis de roulettes et qui pouvaient se déplacer toutes seules dans le palais des dieux. Il faut cependant attendre le XVII^{ème} siècle pour trouver les premières réflexions sur la dualité homme-machine. En 1636, Descartes, dans la cinquième partie du discours de la méthode, soulève la question de savoir jusqu'à quel point une machine est capable d'imiter le raisonnement humain. Descartes fixe déjà les limites de ces machines.

"Car au lieu que la raison est un instrument universel qui peut servir en toute sorte de rencontres, ces organes ont besoin de quelque particulière disposition pour chaque action particulière; d'où vient qu'il est moralement impossible qu'il y ait assez de divers en une machine pour la faire agir en toutes les occurrences de la vie, de la même façon que notre raison nous fait agir " [Des90].

Les objections face à la réflexion de Descartes ont porté longtemps sur l'aspect fonctionnel de ces machines. Elles n'ont plus de sens aujourd'hui avec le développement d'ordinateurs puissants qui peuvent prendre un nombre infini d'états possibles. Mais, en réalité, l'objection formulée par Descartes est de nature plus théologique que fonctionnelle car il insiste sur le côté moral de l'impossibilité.

En 1950, Turing publiait le jeu de l'imitation dans son article " Can a machine think ? ". Le jeu présenté par Turing propose une discussion sur le thème "penser et machine". Un homme A et une femme B sont placés dans une pièce et communiquent avec une troisième personne qui ni ne les voit ni ne les entend. Le jeu consiste, pour C, à deviner à partir de leurs réponses qui est l'homme et qui est la femme, sachant que A et B peuvent fournir des réponses erronées. Turing peut être considéré en quelque sorte comme le père de l'intelligence artificielle en concevant le jeu de l'imitation où la question initiale " Une machine peut-elle penser ?" a été remplacée par la question suivante: " Peut-on imaginer une machine numérique qui jouerait correctement le jeu de l'imitation ?".

En analysant les travaux effectués par Descartes et Turing, il convient de distinguer rigoureusement la notion d'intelligence de ce que l'on appelle esprit ou pensée, c'est-à-dire la dimension spirituelle dont est empreinte l'activité rationnelle. L'intelligence artificielle suppose l'intelligence dans le comportement humain, mais elle ne suppose pas que l'homme doit se

réduire à ses comportements. L'intelligence artificielle se limite à la reproduction d'un homme intelligent et comportemental; par conséquent, son ambition est encore modeste. L'objectif n'est pas de simuler l'ensemble de la pensée ou de la raison, mais de fournir des résultats qui peuvent être semblables à ceux produits par l'intelligence humaine. En admettant que raison et intelligence ne soient pas confondues, les applications de l'intelligence artificielle peuvent être considérées comme des outils techniques qui visent non pas à se substituer à l'homme, mais à le compléter par leur vitesse et leur capacité de calcul.

La naissance de la discipline à proprement dite provient d'un groupe de chercheurs réunis pour une école d'été à Dartmouth College en 1956. En rupture avec la cybernétique, l'intelligence artificielle renonce à la modélisation de phénomènes complexes pour étudier une modélisation de la prise de décision. Cependant, l'informatique semble n'avoir découvert l'intelligence artificielle que vingt ans après sa constitution en discipline scientifique. Différentes raisons peuvent être invoquées. Tout d'abord les outils : d'un point de vue logiciel, le langage symbolique LISP (1958) a été conçu et développé au sein d'une université au contraire des langages COBOL et FORTRAN (1956) qui proviennent respectivement du département de la Défense des Etats-Unis et de l'Industrie. Les forces inégales expliquent le succès des uns et l'échec de l'utilisation du LISP. D'autre part, le hardware du modèle proposé par Von Neumann [Neu63] était inadéquat à la mise en oeuvre de mécanismes fortement parallèles. Le réveil de l'intelligence artificielle correspond au défi japonais dit d'ordinateurs de cinquième génération, et par conséquent, au développement d'architectures d'ordinateurs et de logiciels plus appropriés à cette discipline. Ces améliorations permettent d'amorcer un développement qui peut être considéré comme irréversible, faisant de l'intelligence artificielle une composante omniprésente de l'informatique.

2.1.2. Définition de la notion d'intelligence artificielle

L'intelligence artificielle peut être définie comme:

L'ensemble des méthodes et des techniques qui visent à étudier le comportement de l'homme pour le comprendre et le reproduire [Bul90].

La définition proposée pour l'intelligence artificielle laisse sous-entendre la nécessité d'une recherche pluridisciplinaire. Les recherches doivent intégrer les travaux des :

- électroniciens (matériel)
- épistémologues et psychologues (pensée)
- informaticiens
- mathématiciens
- neurophysiologues (cerveau)

La réflexion au sujet de l'intelligence artificielle nécessite également une réflexion de l'homme sur lui-même, c'est-à-dire qu'il doit observer son intelligence de manière objective. Pour l'instant, la plupart des outils symboliques à notre disposition permettent uniquement d'analyser ce qui

nous est extérieur. Malgré les espoirs contenus dans la recherche en intelligence artificielle, celle-ci a l'handicap de ne posséder aucune base théorique à l'opposé de toutes les disciplines scientifiques classiques (mécanique, physique,...).

2.2. Les systèmes experts

Les recherches en intelligence artificielle découlent du besoin de développer des programmes capables de résoudre des problèmes d'une manière considérée comme intelligente, c'est-à-dire de manière semblable à celle utilisée par les hommes. L'un des objectifs est de concevoir des systèmes capables de reproduire le comportement de l'être humain dans ses activités de raisonnement. Les systèmes experts constituent une manifestation de ce besoin. Au début des années soixante, les informaticiens cherchaient à développer des programmes généraux qui se sont révélés des monstres à développer et à maintenir. Après quelques échecs, les informaticiens sont revenus à des programmes beaucoup plus spécifiques. Les systèmes experts ont débuté lorsque les informaticiens ont pris conscience que la puissance d'un programme réside dans la connaissance qu'il possède. En effet, pour rendre un programme intelligent, il est nécessaire de lui fournir une quantité importante d'informations de qualité et spécifique au domaine du problème à résoudre. Aujourd'hui, le domaine d'activités des systèmes experts représente un des pôles majeurs de l'application des recherches en intelligence artificielle.

2.2.1. Définition d'un système expert

Les recherches dans les systèmes experts s'appuient sur l'hypothèse selon laquelle tout processus décisionnel est modélisable selon des règles analytiques et formelles. Du point de vue de ses spécificités extérieures, un système expert peut être défini de la manière suivante :

Un système expert est un système logiciel informatique qui est capable de donner sur un sujet particulier un conseil égal en qualité à celui qui pourrait être donné par un expert humain reconnu [Bul90].

Cette définition fonctionnelle des systèmes experts ne permet pas de les caractériser en comparaison de l'informatique classique. De manière générale, l'informatique classique et les systèmes experts sont souvent mis en opposition en associant à la première la manipulation des nombres et à la seconde la manipulation des connaissances. De prime abord, cela ne constitue pas une différence judicieuse. Un ordinateur manipule toujours des représentations de connaissances numériques. La différence entre ces deux formes de programmation peut être mise en évidence par la distinction entre les langages de programmation algorithmiques et les langages qualifiés de déclaratifs.

L'approche algorithmique comprend la logique caractéristique du problème posé et la logique caractéristique du processus avec lequel le problème modélisé va être résolu. L'originalité de l'approche déclarative est essentiellement contenue dans la forme de description des connaissances. Les connaissances sont introduites sous la forme de faits caractéristiques et de

relations logiques entre ceux-ci, sans se préoccuper du processeur sur lequel la connaissance va être logiquement analysée.

2.2.2. Constituants d'un système expert

L'architecture d'un système expert est constituée des différents éléments suivants (figure 2.1).

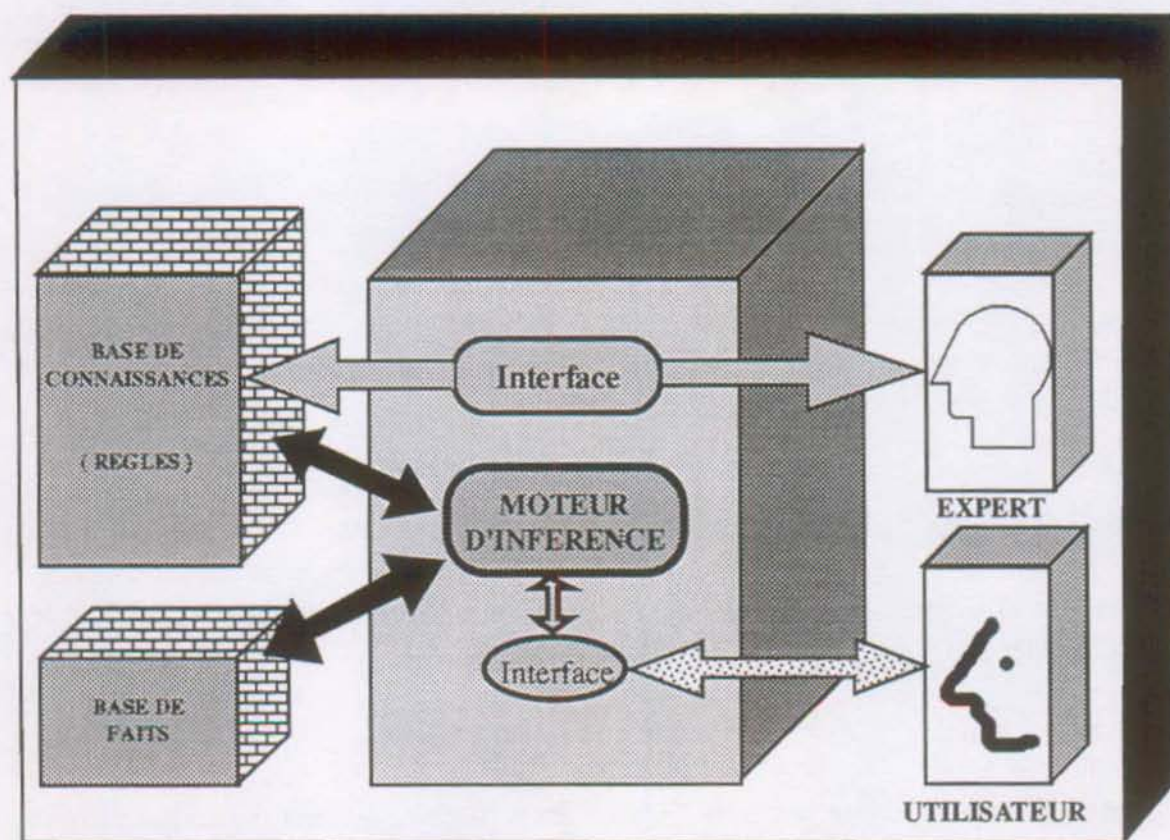


Figure 2.1: Les constituants d'un système expert

a) L'expert

L'acquisition de la connaissance de l'expert est la première tâche à effectuer pour constituer un système expert. Le système comprend un interface pour l'introduction et la mise à jour des connaissances. Ce module d'acquisition peut être un simple éditeur de texte ou un éditeur spécialisé. De manière idéale, la connaissance devrait être introduite par un ingénieur du domaine traité (cogniticien ou ingénieur de la connaissance). Ce sont des personnes qui ont une double compétence. Ils ont des connaissances approfondies dans le domaine d'expertise, ce qui leur permet de dialoguer avec le vocabulaire approprié utilisé par les experts. De plus, ils possèdent également les connaissances du domaine de l'intelligence artificielle, de manière à utiliser des représentations appropriées pour structurer et formaliser la connaissance de l'expert.

b) L'utilisateur

Généralement, les applications systèmes experts sont conviviales et utiles pour l'utilisateur. Ceci est naturellement vrai lorsque l'environnement de développement pour le système expert a la

capacité d'être convivial. Cependant, la personne qui a la tâche de concevoir le système expert doit être consciente du rôle de l'utilisateur dans le fonctionnement de l'application finale. Elle doit créer le système en fonction de celui-ci. Paradoxalement, plus l'application développée est de bonne qualité et utile pour l'utilisateur, plus le système a tendance à chercher et à enseigner à l'utilisateur la manière de résoudre le problème. L'utilisateur pense alors en savoir assez et, par conséquent, se détourne de l'utilisation du système expert développé. De manière à assurer une utilisation, celui-ci ne doit pas exiger la connaissance d'un nombre trop important d'instructions. L'interface de dialogue doit être conçue pour un utilisateur qui n'est pas forcément expert dans le domaine traité par l'application et, bien entendu, l'utilisation de cette interface ne doit pas exiger de connaissances informatiques.

c) Base de règles

La base de règles est un des deux constituants de la base de connaissances. Une fois les connaissances introduites sous la forme de règles, celles-ci restent inchangées tout au long du fonctionnement du système. Elle constitue par conséquent la connaissance permanente.

d) Base de faits

La base de faits constitue la mémoire de travail du système à base de connaissances. Elle contient les données initiales et ensuite les données recueillies par les hypothèses émises et les faits apparus avant de parvenir à la solution du problème en cours de traitement par le système expert. C'est la partie dynamique de la base de connaissances.

e) Moteur d'inférence

Le moteur d'inférence, comme son nom l'indique, est la partie du système expert qui génère les réponses aux questions posées par l'utilisateur. Il constitue le mécanisme de raisonnement chargé d'exploiter les règles. Le moteur accède aux règles et effectue les associations et connexions nécessaires de manière à proposer une conclusion au problème posé. Le type et le nombre de règles n'affectent pas la manière dont le moteur d'inférence effectue sa tâche. Il est possible de modifier, d'ajouter ou de supprimer des règles sans affecter le fonctionnement du moteur d'inférence.

2.3. Représentation des connaissances

L'expérience de l'être humain repose le plus souvent sur l'exploitation d'une masse importante de faits, d'expériences ou de connaissances plus ou moins spécifiques à un domaine particulier. Le terme connaissance doit être compris au sens large du terme, c'est-à-dire toutes les formes de savoir de l'homme. Ce sont tout d'abord les objets de l'environnement dans lequel l'homme évolue. Ce sont aussi des faits, des événements, des relations, des associations, des généralisations qui portent sur des objets ou des concepts de base. Face à cette forme de connaissance brute, il convient de prendre en compte la méta-connaissance, c'est-à-dire la connaissance sur le fonctionnement même des mécanismes du raisonnement propre à l'homme.

Un des domaines fondamentaux de la recherche en intelligence artificielle réside dans la mise au point de mécanismes de formalisation permettant la mise en oeuvre de systèmes à base de connaissances.

Le propos de ce paragraphe n'est pas d'indiquer de manière exhaustive tous les modes possibles de représentation des connaissances, mais plutôt de présenter les concepts les plus largement utilisés dans les systèmes experts.

La représentation des connaissances est considérée comme la manière de la mémoriser dans un ordinateur ou, de manière plus spécifique, dans une base de connaissances. Il y a plusieurs modes de représentation standard de connaissances qui peuvent être utilisés séparément ou en conjonction avec d'autres pour construire un système expert. Chaque technique offre au programme certains avantages, tels que le rendre plus performant ou plus facilement compréhensible. Les modes de représentation les plus utilisés dans les systèmes experts sont les règles de production, les structures d'objets, la logique du premier ordre, la représentation procédurale et les heuristiques. Ce sont ces différents modes de représentation qui vont être exposés. De manière générale, un mode de représentation de connaissances englobe deux principes le plus souvent imbriqués. D'une part, la structure de données utilisée pour représenter l'information et, d'autre part, la méthode associée à l'exploitation de cette information. Les processus de raisonnement permettent de déterminer des informations et des connaissances pour le problème traité. Une base de connaissances se distingue d'une base de données classique pour laquelle il est possible d'extraire uniquement les informations préalablement ordonnées. Différents modes de représentation de connaissances sont présentés ci-dessous :

- Les règles de production
- Les structures d'objets
- La logique formelle
- Les procédures
- Les heuristiques

2.3.1. Les règles de production

C'est la structure déclarative communément utilisée par les systèmes experts. Les règles peuvent être assimilées à un ensemble de constituants élémentaires (par exemple des particules) qui s'assemblent et se combinent pour former une réponse au problème posé. L'ordre dans lequel les règles sont introduites dans la base de connaissances n'est pas important. Par contre, lorsque plusieurs règles peuvent être déclenchées, l'ordre peut jouer un rôle pour le choix de la première règle à considérer. Une règle de production est une partie de connaissance représentée sous la forme suivante :

SI (condition) ALORS (conclusion).

Par la suite, une règle de production sera représentée graphiquement selon la figure 2.2. La partie condition, appelée prémisses, est constituée de propositions logiques qui doivent être

vérifiées pour que la règle puisse être appliquée. La partie conclusion peut correspondre à un déclenchement d'une action ou d'une nouvelle hypothèse.

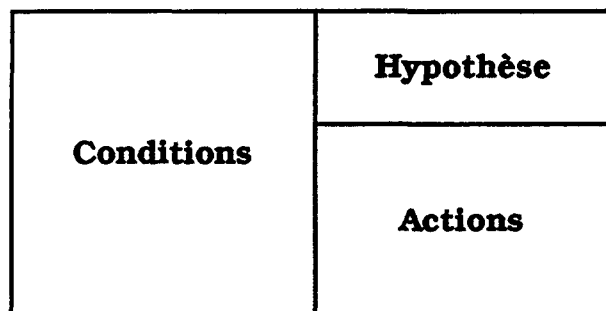


Figure 2.2: Représentation graphique de la structure de base d'une règle

Les avantages principaux attribués à la représentation de connaissances sous forme de règles sont les suivants :

- La modularité propre à chaque règle, car elle peut être considérée comme un îlot de connaissances indépendant. La partie des prémisses contient pour chaque règle les conditions de son application. De par sa structure simple, un système de règles peut être facilement enrichi ou modifié.
- Le caractère naturel de l'expression de la connaissance sous la forme de règles de production constitue un autre avantage. Lors d'interviews avec des spécialistes, ceux-ci formulent fréquemment leur connaissance de cette manière.
- L'accessibilité de la base de règles est rendue facile de par la simplicité et l'uniformité de la structure utilisée. Ceci facilite la maintenance et la manipulation de cette connaissance.

Face à la relative simplicité de mise en oeuvre des règles de production, il faut être également conscient des principaux inconvénients attribués à cette représentation de connaissance :

- L'impossibilité de prévoir un déroulement optimum pour une séquence d'actions constitue une des conséquences de la modularité offerte par la structure de règles. De plus, le balayage systématique des règles constitue un obstacle pour une mise en oeuvre en temps réel, à cause du volume de travail important à effectuer lorsque la base de connaissances comprend un nombre important de règles.
- Assurer la cohérence de la base de connaissances pose problème, car il manque à l'utilisateur une vue d'ensemble qui puisse lui permettre de percevoir l'organisation logique de la base. Difficulté par conséquent de mettre en évidence les fonctionnements algorithmiques de la résolution.

2.3.2. Structure d'objets

Dans de nombreux domaines d'applications se manifeste le besoin d'organiser. L'intelligence artificielle et plus particulièrement l'ensemble des connaissances disponibles pour un certain domaine n'échappe pas à cette tendance. Ce concept provient de recherches effectuées en psychologie sur la mémoire. Dans le domaine de l'intelligence artificielle, le concept a été introduit par Minsky [Min75] sous le nom de frames. L'idée consiste à offrir un support permettant de regrouper l'ensemble des informations disponibles sur un objet considéré au sens large (concept, événement, acte). Ils permettent la structuration des objets ou concepts relatifs à un certain domaine d'activité. Un frame peut contenir à la fois une connaissance macroscopique mais aussi des concepts beaucoup plus profonds qui interviennent de façon évidente chez les humains. Aujourd'hui, ce concept de frame a été largement diffusé sous l'appellation des langages de programmation orientés objets.

a) Frames et scénarios.

Un frame constitue un cadre dans lequel sont regroupées de façon structurée les connaissances relatives à un objet physique. Il comprend un ensemble d'attributs standards qui correspondent, pour chacun d'eux, à une notion associée au concept décrit. Les caractéristiques essentielles des frames sont contenues dans l'existence de méthodes pour déterminer la valeur de chacun des attributs. Chacun des attributs peut avoir une valeur par défaut, un intervalle de valeurs, un ensemble de valeurs possibles ou des procédures qui indiquent au système les actions à effectuer pour déterminer l'état ou la valeur de celui-ci.

Un objet représente un élément utilisé au cours du raisonnement par les règles et les méthodes de la base de connaissances. Par exemple, une ligne, un transformateur spécifique du réseau électrique constituent un objet. Les propriétés représentent les caractéristiques de l'objet. Par exemple, pour l'objet ligne contenu dans la base de connaissances, le courant qui circule ou le nom des noeuds extrémités de la ligne constituent des propriétés de l'objet. Pour la représentation des objets et attributs associés, les représentations graphiques suivantes sont adoptées (figure 2.3) :

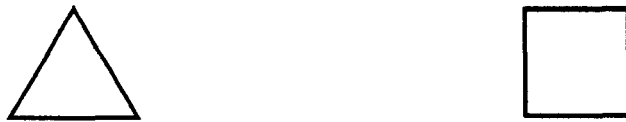


Figure 2.3: Représentation graphique d'un objet et de la propriété d'un objet

La notion de script ou scénario peut être rattachée à la notion de frame. Ils ne sont plus utilisés pour des descriptions statiques d'objets mais des séquences typiques d'événements. Ils comprennent un ensemble d'événements ou d'actions habituellement attachés à la situation considérée.

b) Objets structurés et notion de classe

En cherchant à décrire chaque objet et ses attributs spécifiques, l'information contenue dans la base de connaissances va rapidement devenir redondante. De nombreux objets ont, à l'intérieur d'une même base de connaissances, de nombreuses caractéristiques en commun. Il convient par conséquent de regrouper dans la même classe différents objets qui ont des attributs en commun. Ce regroupement d'objets similaires permet d'associer à chacun d'eux un ensemble de règles ou méthodes pour déterminer les valeurs de chacune des propriétés ou attributs de la classe tout en préservant la notion d'indépendance de chacun d'eux. Les objets sont organisés par niveau d'abstraction et partagent les propriétés par des phénomènes d'héritage. L'héritage constitue un mécanisme de transmission de messages. A l'aide d'un formalisme hiérarchique, l'héritage de propriétés assure la transmission d'un concept à chacun des fils. Par défaut, un objet hérite les propriétés des objets ascendants, plus spécifiques que celles de ses descendants. La représentation graphique suivante sera utilisée pour illustrer la notion de classe (figure 2.4) :

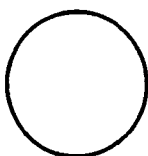


Figure 2.4: Représentation graphique d'une classe

Comme les objets, les classes ont des attributs qui correspondent à des propriétés. Le rôle des propriétés au niveau des classes est de fournir un canevas de propriétés pour chaque objet qui appartient à la classe. Par exemple, tout objet appartenant à la classe ligne va hériter lors de sa création des propriétés appartenant à cette classe (nom des noeuds extrémités de la ligne,...).

Les avantages principaux attribués à la représentation de connaissance sous la forme d'objets sont les suivants :

- L'organisation des faits et concepts sous la forme d'objets offre une clarté et une cohérence au niveau de la mémorisation des informations.
- Les mécanismes d'héritage offrent également une économie au niveau de la quantité d'informations à stocker.

En contrepartie, la structuration de la connaissance sous la forme d'objets conduit également à des inconvénients :

- La structure utilisée pour mémoriser les objets est rigide et ne permet pas de traiter des données autres que celles prévues. Elle n'a pas la possibilité d'évoluer facilement si ce n'est localement en rajoutant par exemple une propriété.

2.3.3. La logique formelle

La logique est un formalisme de la connaissance qui remonte à l'époque des philosophes de l'antiquité grecque (Aristote, II^{ème} siècle av. J.-C.). Une des formes les plus connues de ce formalisme réside dans la définition des syllogismes :

Tous les hommes sont mortels
Or Socrate est un homme
Donc Socrate est mortel

La logique a été un des premiers outils utilisé par l'intelligence artificielle. Les représentations utilisées constituent une représentation déclarative très simple et se basent essentiellement sur la logique mathématique. Il convient de distinguer principalement la logique des propositions et la logique des prédicats du premier ordre. La logique comprend deux choses essentielles. D'une part, ce qui peut être dit et d'autre part, ce que l'on peut dire. Ce qui peut être dit est contenu dans le vocabulaire rassemblant l'ensemble des objets élémentaires connus et les règles selon lesquelles les symboles élémentaires peuvent être combinés. La valeur de vérité, Vrai ou Faux en logique classique, désigne ce que l'on peut dire.

a) La logique des propositions

La logique des propositions constitue la composante la plus simple de la logique classique :

Le terme de proposition recouvre l'idée d'assertion formulée suivant une certaine syntaxe et susceptible de prendre dans un univers donné la valeur "vrai" ou "faux" [Bul90].

La détermination des propositions repose sur l'utilisation de fonctions logiques (ET, OU, NON, IMPLIQUE, EQUIVALENT). Le moteur d'inférence qui permet de traiter la logique des propositions est d'ordre zéro [Dom88]. Le moteur d'inférence peut uniquement sélectionner des règles dont les conditions sont identiques aux faits contenus dans la base, par exemple :

SI la charge de la ligne Bus_3-Bus_7 > 80%, ALORS le déclenchement de la ligne Bus_3-Bus_7 doit être pris en considération.

b) La logique des prédicats du premier ordre

La logique des prédicats du premier ordre offre les moyens de préciser la portée d'assertions beaucoup plus générales et remédie aux insuffisances de la logique des propositions qui ne permet pas de traiter des ensembles d'éléments. Le quantificateur existentiel \exists et le quantificateur universel \forall s'appliquent aux variables. La notion de premier ordre est liée à la quantification des variables. Les prédicats ne peuvent être quantifiés, au contraire des propriétés possédées par un élément. Le moteur d'inférence qui permet le traitement des prédicats du premier ordre est

d'ordre un. Il permet de sélectionner des règles identifiables aux faits de la base à l'aide de valeurs de variables appropriées, par exemple :
SI \exists une ligne dont la charge $> 80\%$, ALORS le déclenchement de la ligne doit être pris en considération.

La logique formelle offre de nombreux avantages :

- Utilisation de bases théoriques solides et uniformes. La logique correspond souvent à la façon naturelle de s'exprimer. Elle constitue un compromis intéressant entre la puissance et la clarté d'expression .

Cependant, elle présente également des inconvénients :

- La rigueur propre à la logique formelle ne permet pas de prendre en compte des appréciations nuancées, car le résultat est toujours booléen (Vrai ou Faux). Cette limitation se manifeste par exemple lorsque le contexte d'interprétation d'une connaissance n'est pas connu avec précision ou certitude. D'autres logiques, comme la logique à plusieurs valeurs ou logique floue, ont été introduites pour contrecarrer ces limitations.

2.3.4. La logique à plusieurs valeurs

La logique à plusieurs valeurs ou logique floue constitue une extension de la logique des prédicats car elle comprend un nombre de valeurs possibles supérieur à deux, ce qui diffère de la logique classique. Cette logique a été spécialement mise au point pour traiter les inexacitudes présentes dans la connaissance utilisée par les experts humains d'un certain domaine. D'un point de vue mathématique, en caractérisant les conditions d'appartenance d'un objet à un groupe, il est possible à l'aide de la théorie des ensembles de déterminer l'appartenance d'un objet à un groupe ou non. Malheureusement, il n'est pas toujours possible en pratique d'identifier et de développer les conditions exactes d'appartenance à un groupe pour tous les concepts et les mécanismes de classification utilisés par l'homme. De manière générale, les humains placent de manière intuitive et par habitude des objets (au sens large du terme) dans des classes dont la signification est bien comprise mais dont les frontières ne sont pas clairement définies. Par exemple, le réseau de transport comprend tous les ouvrages qui ont une capacité thermique élevée.

Pour déterminer les membres d'un ensemble, un niveau d'appartenance est associé à chaque candidat sous la forme d'un nombre (qui indique le degré d'appartenance de l'élément à l'ensemble). Le nombre un indique que le candidat est membre de l'ensemble; par contre, un nombre égal à zéro indique que le candidat doit être exclu de l'ensemble considéré. La transition d'un extrême à l'autre est continue, mais l'association d'un élément ou non à l'ensemble reste subjective pour les valeurs intermédiaires.

Le degré d'appartenance ne peut pas être considéré comme une probabilité d'appartenance à l'ensemble car il ne se fonde pas sur une statistique, mais il n'est qu'une mesure intuitive de

l'appartenance de l'objet à l'ensemble. La manipulation d'ensembles comprenant plusieurs valeurs repose sur l'utilisation de règles logiques bien définies. Le chapitre 5 présente en détails la notion de sous-ensemble flou et son application aux connaissances recueillies par les experts.

2.3.5. Les procédures

Les différents modes de représentation de connaissances qui ont été présentés jusqu'à maintenant sont de nature déclaratifs. Cependant, le mode de représentation procédural ne peut pas être complètement ignoré car chacun d'eux offre des caractéristiques complémentaires. De manière générale, le comportement procédural dans un système expert se rapporte à l'utilisation de procédures classiques algorithmiques.

L'originalité de l'utilisation de la représentation procédurale dans un système expert réside dans le mode de déclenchement qui peut alors être de nature diverse :

- L'affectation d'une valeur à un attribut d'un objet peut exiger le déclenchement d'une procédure.
- Une structure de contrôle est chargée en permanence de déclencher une procédure lorsque une condition est vérifiée.
- La partie action d'une règle déclenchée peut conduire à l'exécution d'une procédure.

De plus en plus, les systèmes experts présentent une structure mixte, comprenant également une partie algorithmique. Cette représentation mixte des connaissances est plus appropriée à la mise en oeuvre de la connaissance et du raisonnement de l'être humain. Cependant, la représentation procédurale introduit à l'intérieur du système expert une rigidité qui a pour conséquence de nuire à la modularité et la souplesse de celui-ci. De plus, elle empêche la mise en oeuvre du processus d'auto-explication qui est intrinsèquement contenu dans l'aspect déclaratif d'un système expert.

2.3.6. Les heuristiques

Pour une base de connaissances comprenant un nombre important de règles, la quantité d'opérations à effectuer pour parcourir l'ensemble des règles dépasse souvent les capacités des ordinateurs à disposition. C'est le problème de l'explosion combinatoire. Le sous-ensemble des règles qui se rapporte au problème considéré doit être pris en considération en premier. C'est là qu'intervient la notion d'heuristique. Elle peut être définie de la manière suivante :

La notion d'heuristique recouvre les règles qui aident à découvrir rapidement une solution mais qui, en contrepartie, ne garantissent aucune exhaustivité [Dom88].

Les heuristiques procèdent par l'instauration de coupures évitant l'exploration de certaines directions de recherche jugées infécondes. Ils orientent la recherche en fonction du but à

résoudre et permettent de formaliser la connaissance propre au traitement du problème considéré, également nommée méta-connaissance. Il faut être cependant conscient de la nécessité d'associer un coût à l'utilisation d'heuristiques. Il est nécessaire de distinguer le coût d'application des règles du coût du contrôle de l'application des règles. Tous deux contribuent au coût total de calcul pour la résolution d'un problème par un système expert. D'une part, s'il faut effectuer de nombreuses opérations pour déterminer les règles à appliquer, le coût de contrôle peut être élevé. D'autre part, le coût d'application des règles devient important s'il n'existe pas d'informations au sujet de la priorité des règles à appliquer. Le point d'équilibre entre ces deux coûts constitue l'optimal à atteindre pour garantir un système intelligent et performant.

En conclusion, la connaissance peut être dissociée en trois niveaux :

- Les faits propres au problème en cours de traitement.
- Les connaissances propres au domaine auquel appartient le problème en cours de traitement. La modélisation de cette connaissance est effectuée à l'aide de règles de production, de la logique formelle, de la représentation procédurale ou d'heuristiques.
- Finalement, la méta-connaissance propre aux heuristiques qui ordonne les connaissances, leur domaine de validité et leur utilisation.

2.4. Mécanismes d'inférences

Un système expert est constitué de règles contenues dans une base de connaissances. Celle-ci contient des faits et des règles qui peuvent être recueillis pour le domaine concerné. Même en étant structurée, la base de connaissances n'explique pas la manière dont les règles sont reliées entre elles. Il est simple de comprendre les interactions entre les règles lorsque leur nombre est restreint, mais la complexité de la tâche augmente avec la taille de la base de connaissances. Le rôle du moteur d'inférence dans un système expert est justement de donner un sens à ces règles en les reliant entre elles, de manière à poser les questions nécessaires pour déterminer les conclusions appropriées. Savoir distinguer les questions des conclusions est important. Sans une stratégie appropriée, un système expert risquerait de ne pas limiter l'utilisation de son moteur d'inférence et de sa base de connaissances au seul problème en cours de traitement. Le temps nécessaire pour traiter un problème deviendrait alors trop important.

De manière générale, il existe deux modes de parcours de la base de connaissances. L'un porte sur le sens de parcours et l'autre sur la stratégie d'exploitation. Le chaînage avant et le chaînage arrière sont communément utilisés pour le parcours des règles. Ils peuvent également être combinés en un chaînage mixte. L'exploitation des règles est basée principalement sur la distinction entre une recherche en profondeur et une recherche en largeur. D'autre part, la recherche peut être grandement diminuée par l'utilisation d'heuristiques.

2.4.1. Le chaînage avant

Un processus de recherche basé sur le chaînage avant démarre à partir d'une prémisse. Le moteur d'inférence considère uniquement les règles de gauche à droite, c'est-à-dire dans le sens condition \rightarrow conclusion.

Pour chaque étape du raisonnement, le processus emprunté par le moteur d'inférence comprend trois phases :

- Identification des règles pour lesquelles les prémisses sont vérifiées à partir du contenu courant de la base des faits.
- Sélection d'une règle parmi celles qui satisfont les prémisses. Cette sélection est effectuée en considérant différents heuristiques possibles :
 - Une règle jamais évaluée
 - Une règle au hasard
 - La règle avec le coefficient de vraisemblance le plus important

Cette phase est généralement appelée résolution des conflits, qui consiste à déterminer pour un ensemble de règles données la règle à déclencher.

- Application de la règle choisie.

Graphiquement, le fonctionnement du chaînage avant sur les règles est représenté par un exemple à la figure 2.5 en utilisant la convention de représentation proposée au paragraphe 2.3.1. Les conditions et les hypothèses les plus sombres sont exécutées avant les conditions et les hypothèses claires lorsque l'hypothèse tout à gauche est suggérée.

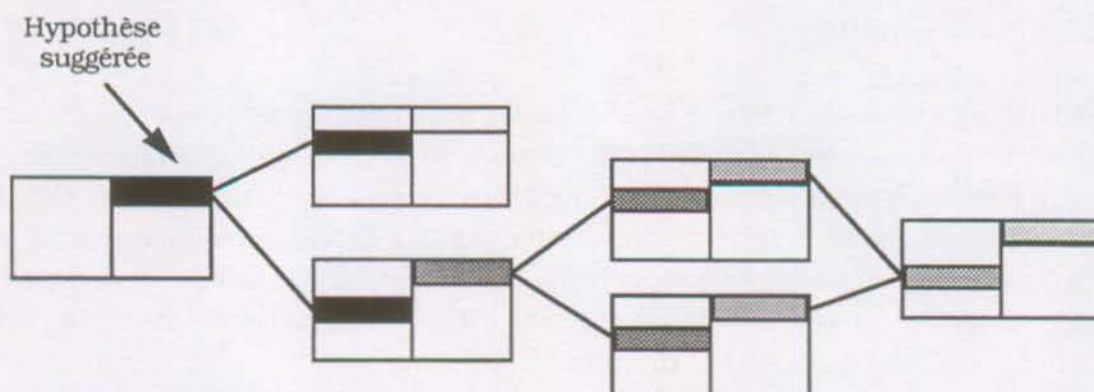


Figure 2.5: Fonctionnement du moteur d'inférence en chaînage avant

2.4.2. Le chaînage arrière

Le chaînage arrière est basé sur l'utilisation d'un raisonnement centré sur le but. Il consiste à déterminer les opérateurs qui permettent d'atteindre ce but. Les conditions de ces opérateurs deviennent de nouveaux objectifs à atteindre et ainsi de suite. Le moteur d'inférence utilise les règles de droite à gauche, c'est-à-dire dans le sens conclusion \rightarrow condition.

Le moteur d'inférence considère le but initial à vérifier et utilise un cycle à trois phases semblable à celui du chaînage avant pour chaque étape de raisonnement.

Graphiquement, le fonctionnement du chaînage arrière sur les règles est représenté par un exemple à la figure 2.6 en utilisant la convention de représentation proposée au paragraphe 2.3.1. Les conditions et les hypothèses les plus sombres sont exécutées avant les conditions et les hypothèses claires lorsque l'hypothèse tout à droite est suggérée.

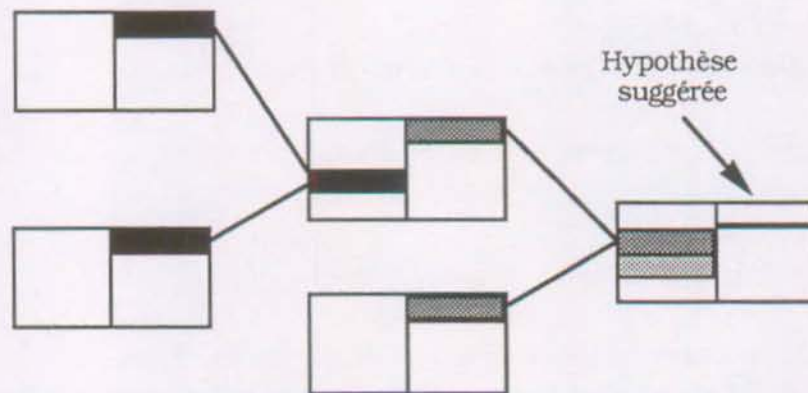


Figure 2.6: Fonctionnement du moteur d'inférence en chaînage arrière

2.4.3. Le chaînage mixte

L'utilisation d'un chaînage mixte se justifie, car les deux mécanismes considérés de manière indépendante ne correspondent pas aux mêmes préoccupations. Le chaînage mixte correspond dans une plus large mesure au fonctionnement du raisonnement humain. D'une part, l'être humain utilise une démarche conduite par les informations à disposition et d'autre part, il utilise une démarche guidée par les buts à atteindre. En utilisant des règles de production et un chaînage mixte, il est possible de reconstituer d'une certaine manière le mécanisme de fonctionnement du raisonnement de l'être humain.

Graphiquement, le fonctionnement du chaînage mixte est représenté par un exemple à la figure 2.7. Les conditions et les hypothèses les plus sombres sont exécutées avant les conditions et les hypothèses claires pour l'hypothèse suggérée. Le moteur d'inférence ordonne les hypothèses suggérées en fonction du mode par lequel elle a été déclenchée. Dans l'exemple présenté, le déclenchement par chaînage arrière a une priorité plus élevée que le déclenchement par chaînage avant.

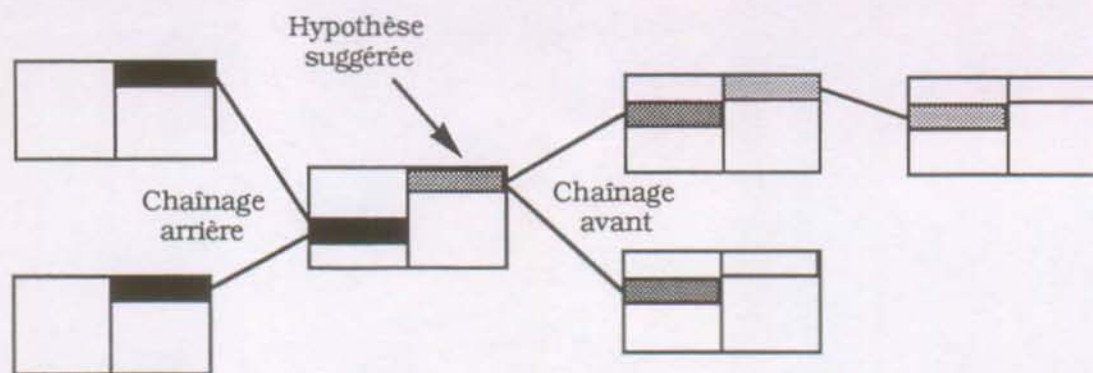


Figure 2.7: Fonctionnement du moteur d'inférence en chaînage mixte

2.4.4. L'orientation de la recherche

Un système expert n'a pas seulement la possibilité d'effectuer une recherche en avant et en arrière pour le déclenchement de règles, mais il oriente également sa recherche en profondeur ou en largeur. Ce deuxième mode de recherche est particulièrement utilisé pour la résolution de conflits, lorsqu'il est nécessaire de déterminer la valeur d'une propriété d'un objet.

a) Recherche en profondeur ("depth-first search")

C'est la forme de recherche habituellement utilisée par un système expert. C'est une recherche à l'intérieur d'un graphe où chacun des noeuds est traité selon la règle "Dernier noeud arrivé, premier noeud pris en considération". Chaque arc du graphe est traité jusqu'à son extrémité avant de passer au suivant.

b) Recherche en largeur ("breadth-first search")

Dans le cas d'une stratégie basée sur la recherche en largeur, le premier noeud arrivé est le premier traité. Le graphe est balayé par niveau de profondeur. La solution proposée est la plus courte, mais elle n'est pas nécessairement optimum en ce qui concerne le coût de calcul.

La figure 2.8 ci-dessous présente une résolution de conflit pour l'héritage de la valeur d'une propriété d'un objet. L'exemple présenté est tout à fait général, car la structure attachée à l'objet générique comprend des objets et des classes. Il est par conséquent possible de distinguer en plus de la priorité associée au sens de parcours, une priorité associée aux classes ou aux objets.

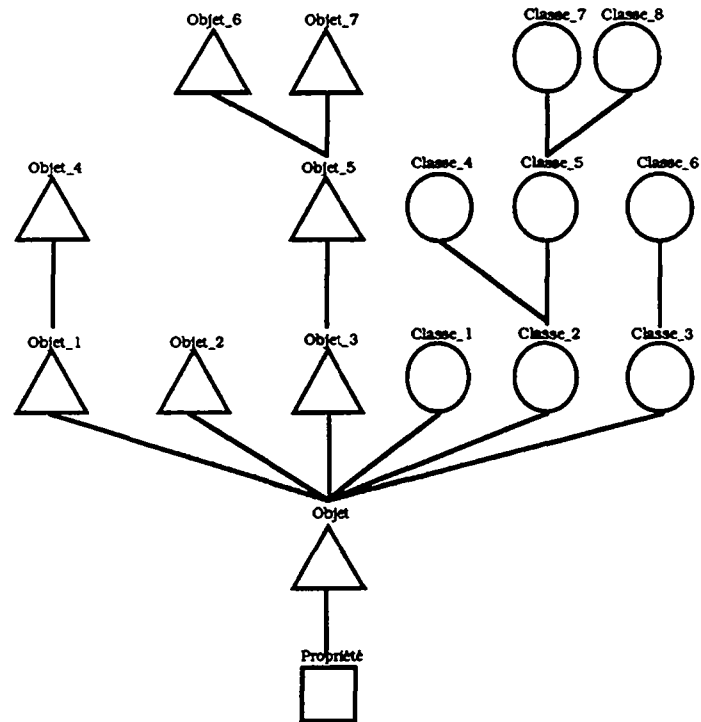


Figure 2.8: Résolution de conflits

Pour une stratégie de recherche en profondeur avec priorité à la notion de classe, le processus de recherche procédera dans l'ordre suivant :

Classe_1, classe_2, classe_4, classe_5, classe_7, classe_8, classe_3, classe_6, objet_1, objet_4, objet_2, objet_3, objet_5, objet_6, objet_7.

Pour une stratégie de recherche en largeur avec priorité à la notion d'objet, le processus de recherche procédera dans l'ordre suivant :

Objet_1, objet_2, objet_3, objet_4, objet_5, objet_6, objet_7, classe_1, classe_2, classe_3, classe_4, classe_5, classe_6, classe_7, classe_8

2.5. Approche proposée pour l'analyse de sécurité

L'approche proposée consiste à concevoir et à développer un système expert pour identifier les violations des contraintes thermiques suite à une contingence simple ou double. La source de connaissances est triple :

- Connaissances provenant de l'expert.
- Connaissances provenant de l'analyse de la situation présente du réseau.
- Connaissances provenant de l'expérience associée à l'analyse de situations antérieures.

Le système expert est qualifié d'hybride car il comprend des connaissances de nature logique (règles de production, structure d'objets, heuristiques), mais aussi des connaissances de nature procédurale. Le système doit être capable de traiter ces deux sources d'informations de manière à établir un diagnostic à la suite d'une analyse de sécurité N-1 ou N-2 ou d'une demande d'analyse d'une contingence simple ou double spécifiée par l'utilisateur.

Afin d'analyser la situation courante du réseau électrique, le système expert doit posséder des modules qui puissent calculer et analyser la topologie ou la charge des branches. L'idée principale est de ne pas recourir à l'utilisation systématique d'un calcul de répartition de puissances pour déterminer un diagnostic suite à une contingence. Le système expert doit également comprendre un module de calcul de répartition de puissance pour déterminer les transits de puissance au cas où il ne serait pas capable d'établir un diagnostic par sa seule connaissance.

Le rôle principal du système expert est de gérer l'information à sa disposition et d'analyser les résultats des règles déclenchées pour déterminer la vulnérabilité du réseau face à la contingence analysée. Le résultat final attendu est une liste des contingences conduisant à des violations de contraintes thermiques avec une évaluation des transits dans les différentes branches du réseau pour chacune de ces contingences. Le système expert doit être également capable de présenter à l'utilisateur les contingences les plus sévères suite à une analyse systématique des contingences simples ou doubles.

2.5.1. Pourquoi utiliser un système expert plutôt qu'un expert ?

Plusieurs facteurs conduisent à la nécessité de développer un système expert. Même en faisant abstraction de la complexité du problème à résoudre et des raisons qui ont conduit au développement d'un système expert, celui-ci offre de nombreux avantages par rapport à l'utilisation d'un expert.

Un des premières raisons est la permanence de l'expertise contenue dans un système expert. Cette expertise ne dépend plus de l'état physique et psychologique de l'expert. Les raisonnements effectués par un système expert sont plus consistants et les résultats plus reproductibles que ceux d'un expert. Un expert peut conclure différemment en fonction de son état, par exemple en situation de stress. Un autre raison réside dans la facilité avec laquelle il est possible de transférer ou de reproduire la connaissance. De manière générale, le transfert de

connaissance d'une personne à une autre est généralement long et laborieux. Une connaissance artificielle est beaucoup plus facile à documenter. De plus, il y a une relative identification entre la manière avec laquelle l'expertise est contenue dans le système et la description naturelle de cette représentation à l'aide du langage. Finalement, une dernière raison est certainement le coût financier d'un tel système qui se limite aux coûts de développement et de maintenance.

2.5.2. Architecture du système expert

Les connaissances recueillies pour traiter le problème de la sécurité d'un réseau électrique en régime permanent peuvent être classifiées en quatre groupes principaux :

- Connaissances utilisées pour déterminer de manière qualitative la vulnérabilité du système face à la contingence.
- Connaissances nécessaires pour déterminer de manière quantitative la vulnérabilité du système face à la contingence.
- Connaissances nécessaires pour filtrer les contingences à présenter à l'utilisateur.
- Connaissances utilisées pour déterminer s'il existe des recommandations qui puissent permettre au réseau de retrouver un état sain.

L'architecture du système expert à développer est représentée à la figure 2.9.

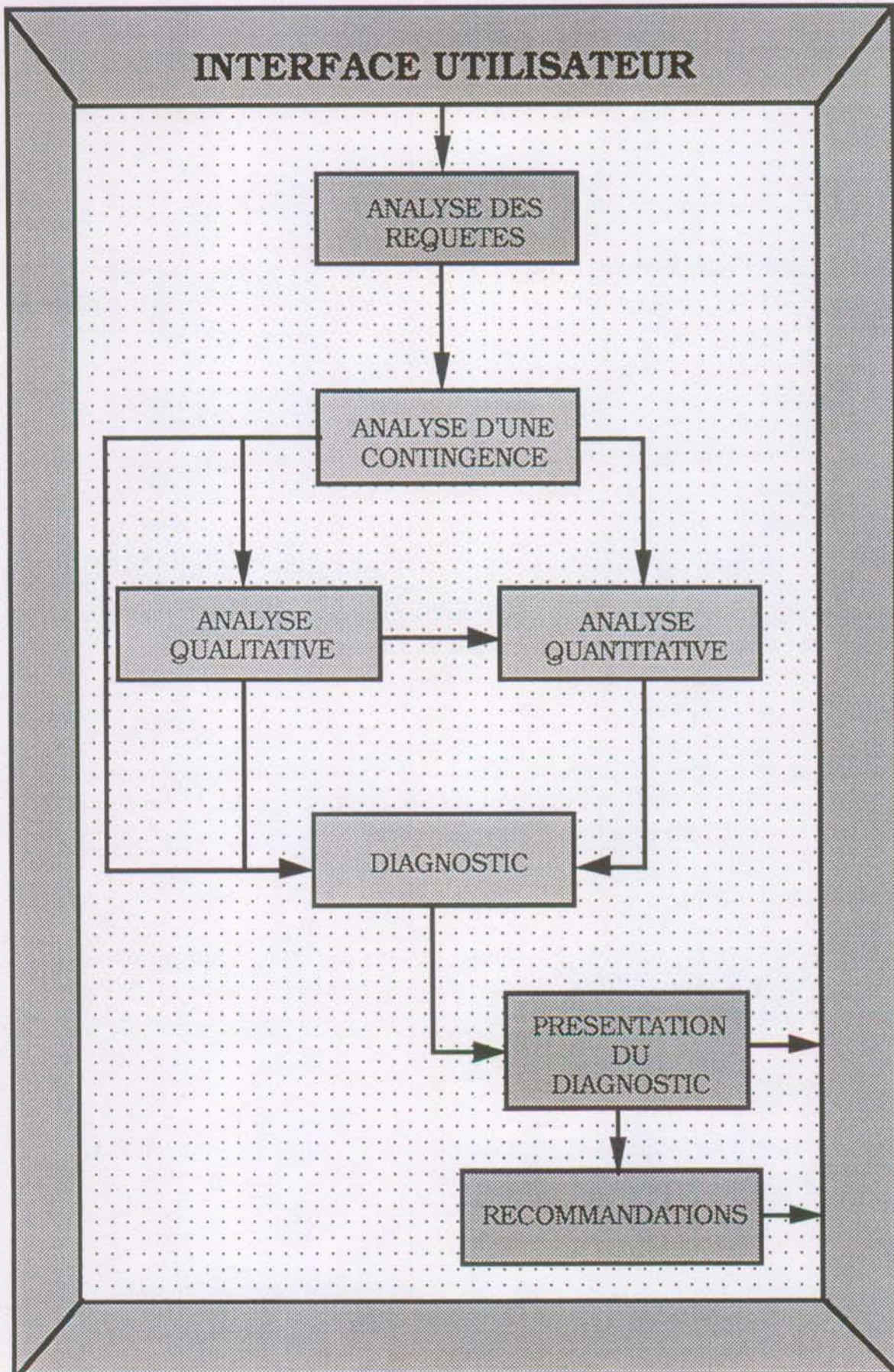


Figure 2.9: Architecture du système expert

Analyse des requêtes

Ce module a pour tâche d'analyser et gérer les différentes requêtes générées par un utilisateur. Il doit contrôler et mettre en place la structure nécessaire pour l'analyse d'une requête effectuée par l'utilisateur.

Analyse d'une contingence

Ce module a pour rôle de gérer l'analyse d'une contingence, c'est-à-dire de mémoriser les résultats de l'analyse et de coordonner la mise en oeuvre des différentes sources de connaissance.

Analyse qualitative

Ce module comprend toutes les connaissances mises en jeu pour déterminer si la contingence est critique ou non, sans la mise en oeuvre de modèles procéduraux.

Analyse quantitative

Ce module comprend les différents modèles procéduraux pour la détermination sous forme algorithmique et heuristique du statut critique de la contingence.

Diagnostic

Les connaissances contenues dans ce module sont utilisées pour établir le diagnostic final de la contingence, en effectuant une synthèse des diagnostics proposés par les différentes règles ou méthodes prises en considération par le moteur d'inférence.

Présentation du diagnostic

Le rôle de ce module est de filtrer les résultats provenant de l'analyse de une ou plusieurs contingences, afin de présenter les résultats à l'opérateur de manière compréhensible et sans le submerger d'informations.

Recommandations

Le rôle de ce module est de présenter à l'opérateur une suite d'opérations simples pour rétablir le réseau dans un état sain suite à une contingence critique. Le système ne peut garantir une solution, sans délestage de charge, pour chaque contingence critique.

2.6. Conclusion

Ce chapitre a discuté la notion de système expert en le situant dans le contexte de l'intelligence artificielle. Les différentes formes de représentation des connaissances envisageables à l'intérieur

d'un système expert ont été détaillées. En rapport avec les modes de représentation des connaissances, les mécanismes d'inférence communément utilisés ont été également décrits. Finalement, ce chapitre a présenté l'architecture d'un système expert qui puisse réaliser la tâche de l'analyse de sécurité et plus particulièrement l'identification des contingences critiques pour le réseau électrique. Les chapitres qui vont suivre ont été écrits dans le souci de pouvoir assurer le développement du système expert proposé.

Chapitre 3

Création et exploitation d'une base de connaissances quantitatives

Ce chapitre présente la manière de déterminer l'état du réseau suite à une contingence et plus particulièrement le calcul des transits de puissance dans les branches.

D'une part, ce chapitre traite de manière succincte l'approche classique basée sur la mise en équations et la résolution de ces équations. D'autre part, il présente une nouvelle approche qui permet d'estimer les transits dans les branches du réseau suite à une contingence. Cette méthode conjugue une approche algorithmique et systématique, pour laquelle on dispose de nombreux outils d'analyse, avec une approche basée sur l'expérience, c'est-à-dire la connaissance de situations antérieures. Une base de connaissances est construite à l'aide des connaissances quantitatives recueillies suite à une analyse systématique des contingences simples. Cette base de connaissances est exploitée pour déterminer les contingences simples autour du point de fonctionnement pour lequel la base de connaissances a été établie. Elle permet également d'évaluer les contingences doubles pour le point de fonctionnement correspondant à la base de connaissances considérée.

Une deuxième utilisation de la base de connaissances est proposée pour extraire des règles qualitatives. A partir des bases de connaissances constituées pour différents points de fonctionnement du réseau, la connaissance acquise pour chacune d'elle est corrélée avec la connaissance correspondante pour d'autres points de fonctionnement du réseau considéré. Les résultats obtenus pour les différentes intercorrélations sont ensuite utilisés, sous la forme de règles, pour d'une part déterminer la possibilité d'utiliser les connaissances acquises et, d'autre part, déterminer la région influencée par le déclenchement.

3.1. Calcul de répartition de puissance dans un réseau

Le problème consiste à déterminer la répartition de charge et les tensions aux noeuds d'un réseau électrique pour un régime de fonctionnement donné. Le régime de fonctionnement du réseau est spécifié en associant quatre grandeurs électriques à chacun des noeuds :

- Le bilan de puissance active et réactive de chacun des noeuds.

- Le module de la tension et sa phase pour chacun des noeuds.

Trois différents types de noeuds sont considérés :

- Noeud producteur

La puissance active P_i et le module de la tension U_i sont spécifiés.

- Noeud consommateur

La puissance active P_i et réactive Q_i est spécifiée.

- Noeud bilan

Comme son nom l'indique, le noeud bilan est chargé de fournir la différence du bilan consommation/production de manière à satisfaire l'égalité ci-dessous:

$$\Sigma \text{ consommations} + \Sigma \text{ pertes} = \Sigma \text{ productions}$$

Il est nécessaire de spécifier un noeud bilan par réseau pour lequel le module de tension U_i et la phase sont spécifiés. La phase est généralement choisie nulle.

Connaissant les caractéristiques électriques des lignes et transformateurs, il est possible de formuler le problème à l'aide d'un système d'équations non linéaires.

3.1.1. Formulation mathématique

D'un point de vue mathématique, le problème consiste à résoudre un nombre d'équations non linéaires dont le nombre est proportionnel à la taille du réseau considéré. La résolution d'un système d'équations non-linéaires soulève des problèmes mathématiques de nature différente tels l'existence d'une solution, la réalité pratique de la solution, le traitement numérique des matrices et plus particulièrement l'exploitation des propriétés des matrices creuses. Le propos de ce paragraphe n'est pas de décrire en détails les différents problèmes mathématiques à traiter, mais de présenter les équations générales du calcul de la répartition de puissance.

Les inconnues et les données sont liées par des équations qui expriment la puissance complexe consommée ou produite pour chacun des noeuds. Pour un réseau électrique parcouru par un courant alternatif, le régime permanent sinusoïdal peut être représenté à l'aide du système d'équations suivant:

$$\underline{I} = \underline{Y} \cdot \underline{U} \tag{3.1}$$

- \underline{Y} : Matrice d'admittance nodale du réseau
- \underline{I} : Vecteur des courants injectés en chaque noeud du réseau
- \underline{U} : Vecteur des tensions en chacun des noeuds du réseau.

\underline{Y} est une matrice complexe de taille $N \times N$ où N est le nombre de noeuds du réseau. Les éléments de la matrice d'admittance nodale sont calculés sur la base des caractéristiques physiques des lignes et des transformateurs. Cette matrice a la propriété d'être creuse. \underline{I} et \underline{U} sont des grandeurs complexes.

Pour chacun des noeuds du réseau il est possible d'écrire l'équation suivante :

$$\underline{I}_p = \underline{Y}_{pp} \cdot \underline{U}_p + \sum_{q \in E} \underline{Y}_{pq} \cdot \underline{U}_q \quad p = 1, \dots, N \quad (3.2)$$

\underline{I}_p : Courant complexe injecté au noeud p .

\underline{Y}_{pp} : Element de la matrice d'admittance nodale.

\underline{Y}_{pq} : Element de la matrice d'admittance nodale.

\underline{U}_p : Tension complexe au noeud p .

\underline{U}_q : Tension complexe au noeud q .

où E désigne l'ensemble des noeuds connectés au noeud p . Généralement, un modèle basé sur l'utilisation des puissances et tensions complexes est préféré à un modèle basé sur une description courants-tensions complexes. Les puissances actives et réactives s'expriment de la manière suivante pour le noeud p :

$$P_p - jQ_p = \underline{U}_p^* \cdot \underline{I}_p \quad (3.3)$$

P_p : Puissance active au noeud p .

Q_p : Puissance réactive au noeud q .

\underline{U}_p^* : Conjugué complexe de la tension au noeud p .

En substituant (3.2) à (3.3), chacune des N équations s'exprime de la manière suivante :

$$P_p - jQ_p = \underline{U}_p^* \cdot \underline{U}_p \cdot \underline{Y}_{pp} + \underline{U}_p^* \cdot \sum_{q \in E} \underline{Y}_{pq} \cdot \underline{U}_q \quad (3.4)$$

Chacune des équations obtenues pour la puissance injectée en un noeud est une fonction non linéaire des tensions nodales (quadratique).

3.1.2. Résolution du système d'équations

La résolution de ce système d'équations non-linéaires est un domaine où les publications abondent. Ce paragraphe se contente de présenter succinctement les deux principaux groupes de méthodes utilisées pour la résolution de ce système d'équations. De plus amples détails sur la mise en oeuvre et les performances des méthodes utilisées peuvent être trouvés dans la thèse de F. Garvizu [Gar87].

Le premier groupe de méthodes est basé sur une approche itérative où la solution à l'itération k est calculée sur la base des résultats obtenus à l'itération précédente. Un des algorithmes les plus connus est celui proposé par Gauss-Seidel [Sta68]. Les valeurs initiales des tensions et angles sont choisies de manière arbitraire. Cet algorithme converge de manière linéaire et le nombre d'itérations augmente rapidement avec la taille du réseau.

Le deuxième groupe de méthodes est basé sur l'utilisation d'approches de résolution à convergence quadratique. Newton-Raphson [Sta68] est certainement l'algorithme le plus connu et le plus utilisé. L'ensemble des équations est linéarisé en prenant uniquement en considération le premier terme du développement limité en série de Taylor. La méthode de résolution généralement proposée se base sur la factorisation de la matrice et la prise en considération de la structure creuse de cette matrice. Le caractère creux de la matrice permet de limiter l'espace mémoire nécessaire pour le stockage des termes et permet également de diminuer le nombre d'opérations élémentaires à effectuer. Un découplage de l'actif et du réactif permet de diminuer la complexité du système à résoudre et, par conséquent, réduit le temps nécessaire pour le calcul de la solution du Jacobien [Sta68] sans pour autant diminuer la qualité des résultats [Car63].

3.2. Acquisition de connaissances

L'approche proposée pour déterminer l'état du réseau suite à une contingence considère l'utilisation des techniques d'intelligence artificielle et plus particulièrement les systèmes experts. Les règles obtenues par une approche classique des systèmes experts, c'est-à-dire spécifiées par des experts (cf. chapitre 5), ne peuvent pas facilement être appliquées à différents réseaux électriques. Une autre limitation associée aux règles obtenues auprès des exploitants provient du fait que chaque société électrique traite son réseau comme s'il était une entité en soi, alors que dans la plupart des cas il appartient à un réseau interconnecté beaucoup plus grand.

De manière générale, les déclenchements de branches ont une influence sur un nombre restreint de branches. Au lieu de considérer un critère de proximité géographique comme il est intuitivement légitime de le penser, il est préférable de considérer un critère basé sur l'évaluation de la distance électrique entre la branche ou les branches déclenchées et les autres branches du réseau électrique. Cette distance est utilisée pour déterminer la partie du réseau influencée par la contingence.

L'approche proposée consiste à générer de manière systématique une base de connaissances quantitative pour le réseau électrique considéré. Cette base de connaissances est similaire à la

connaissance intuitive qu'un expert détient pour un réseau électrique de taille limitée, mais elle est obtenue pour un réseau de taille illimitée en utilisant une approche numérique. Cette nouvelle approche consiste à exploiter les résultats d'une analyse systématique des contingences simples pour constituer une base de connaissances. Elle est obtenue à l'aide de calculs en temps différé pour un point de fonctionnement et une topologie du réseau électrique étudié.

3.2.1. Constitution de la base de connaissances

L'approche proposée pour la construction d'une base de connaissances consiste à effectuer une analyse systématique des contingences simples pour un état de charge et de production du réseau considéré. Cette analyse systématique permet de quantifier l'influence de chacune des branches déclenchées sur toutes les autres branches du réseau à l'aide d'un calcul de répartition de puissance. L'influence de la branche déclenchée sur les autres branches est représentée par un coefficient d'influence de courant complexe α_{bk} qui quantifie l'influence de la branche déclenchée k sur le courant circulant dans la branche b . Le coefficient d'influence de courant α_{bk} est obtenu en calculant la différence de courant dans la branche b entre l'état initial du réseau et l'état où la branche k a été déclenchée. Ce coefficient d'influence α_{bk} est défini de la manière suivante :

$$\alpha_{bk} = \frac{I'_b - I_b}{I_k} \quad (3.5)$$

- I'_b : Courant dans la branche b après le déclenchement de la branche k .
- I_b : Courant dans la branche b avant le déclenchement de la branche k .
- I_k : Courant dans la branche k déclenchée.
- α_{bk} : Coefficient adimensionnel d'influence de courant pour la branche b dans le cas du déclenchement de la branche k .

La base de connaissances est créée en traitant systématiquement toutes les contingences simples, c'est-à-dire en calculant l'influence de chacun des déclenchements sur le courant qui circule dans les autres branches. L'ensemble des vecteurs de coefficients d'influence de courant constitue la base de connaissances et est appelé tableau d'influence plutôt que matrice d'influence. En effet, il n'y a aucune dépendance entre les colonnes ou les lignes du tableau.

$$[\Delta I_k] = I_k \cdot [\alpha_k] \quad (3.6)$$

- ΔI_k : Vecteur des écarts de courant suite au déclenchement de la branche k .
- I_k : Courant dans la branche k avant le déclenchement.
- α_k : Vecteur des coefficients d'influence de courant propre à la branche k .

L'écart de courant dans les branches du réseau suite au déclenchement de la branche k est obtenu en multipliant le vecteur des coefficients d'influence de courant propre à la branche k par le courant qui circulait dans la branche k pour le point de fonctionnement considéré.

$$\begin{bmatrix} \Delta I_{11} \\ \Delta I_{21} \\ \Delta I_{31} \\ \Delta I_{41} \\ \Delta I_{b1} \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix} \Delta I_{12} \\ \Delta I_{22} \\ \Delta I_{32} \\ \Delta I_{42} \\ \Delta I_{b2} \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix} \Delta I_{13} \\ \Delta I_{23} \\ \Delta I_{33} \\ \Delta I_{43} \\ \Delta I_{b3} \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix} \Delta I_{14} \\ \Delta I_{24} \\ \Delta I_{34} \\ \Delta I_{44} \\ \Delta I_{b4} \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix} \Delta I_{1b} \\ \Delta I_{2b} \\ \Delta I_{3b} \\ \Delta I_{4b} \\ \Delta I_{bb} \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_b \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix} \alpha_{11} \\ \alpha_{21} \\ \alpha_{31} \\ \alpha_{41} \\ \alpha_{b1} \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix} \alpha_{12} \\ \alpha_{22} \\ \alpha_{32} \\ \alpha_{42} \\ \alpha_{b2} \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix} \alpha_{13} \\ \alpha_{23} \\ \alpha_{33} \\ \alpha_{43} \\ \alpha_{b3} \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix} \alpha_{14} \\ \alpha_{24} \\ \alpha_{34} \\ \alpha_{44} \\ \alpha_{b4} \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix} \alpha_{1b} \\ \alpha_{2b} \\ \alpha_{3b} \\ \alpha_{4b} \\ \alpha_{bb} \end{bmatrix}$$

Remarque : $\alpha_{kk} = -1$ et le tableau n'est pas symétrique.

Le calcul des coefficients d'influence de courant α_{bk} impose quelques contraintes et limitations:

- Le calcul des coefficients d'influence de courant nécessite du temps et par conséquent, ne peut pas être effectué en temps réel.
- Les coefficients d'influence de courant sont calculés pour une topologie donnée et un régime de fonctionnement.

3.3. Exploitation de la base de connaissances

La base de connaissances peut être utilisée de deux manières différentes.

La première utilisation consiste à déterminer l'état du réseau, c'est-à-dire les transits de puissance dans les branches du réseau suite à une contingence simple autour du point de fonctionnement pour lequel la base de connaissances a été établie. Il est également possible d'étendre la méthode au calcul des contingences doubles avec la base de connaissances correspondante au point de fonctionnement pour lequel elle a été établie.

La deuxième utilisation de la base de connaissances sert à valider et à extraire des règles qui peuvent être ensuite utilisées en temps réel pour déterminer l'état du réseau suite à des contingences simples et doubles. Un des avantages de cette approche est de pouvoir extraire automatiquement des règles qui peuvent être validées en phase d'expérimentation, en comparant l'état du réseau obtenu à l'aide d'un calcul de répartition de puissance et l'état du réseau obtenu en considérant l'utilisation de la base de connaissances. L'utilisation de ces règles doit permettre de déterminer les contingences pour lesquelles il est possible de considérer le tableau des coefficients d'influence de courant pour l'estimation des transits dans les branches du réseau. La figure 3.1 ci-dessous illustre le principe de l'extraction des règles à partir de la base de connaissances.

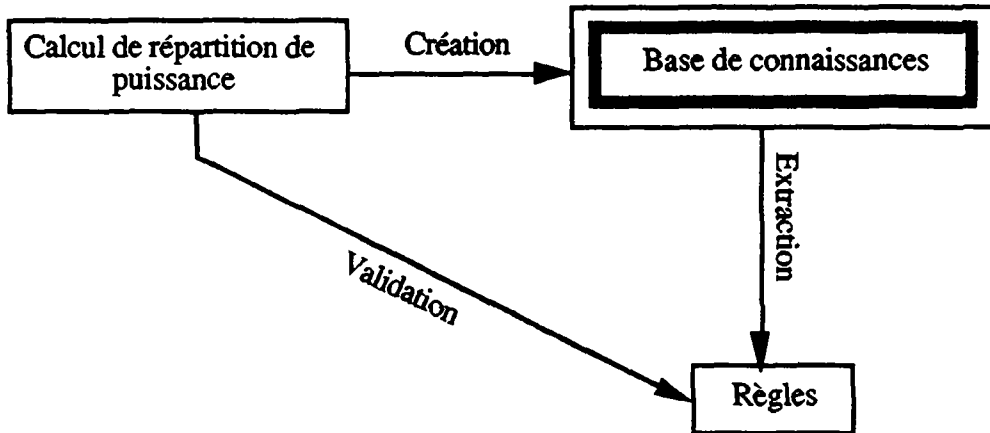


Figure 3.1: Deuxième utilisation de la base de connaissances

3.3.1. Sélection des coefficients d'influence de courant

En considérant l'influence d'un déclenchement sur les autres branches du réseau, il apparaît clairement que le déclenchement modifie la charge d'un nombre restreint de branches. L'intérêt est de déterminer quelles sont les branches influencées lors d'un déclenchement. Une première approche consiste à prendre en considération l'accroissement en valeur absolue de la charge dans chacune des branches suite au déclenchement de la branche considérée. Cependant, cette approche a le désavantage de ne pas considérer l'importance de l'accroissement de charge. Les conséquences d'un accroissement de transit de puissance dans une branche dépendent de l'impédance de la branche, mais également de sa charge relative avant le déclenchement. Par conséquent, une approche plus appropriée consiste à prendre en compte la variation de la marge de courant. A tout coefficient d'influence de courant, il est possible d'associer un coefficient de marge α_{bk} . La figure 3.2 définit le coefficient de marge de la manière suivante :

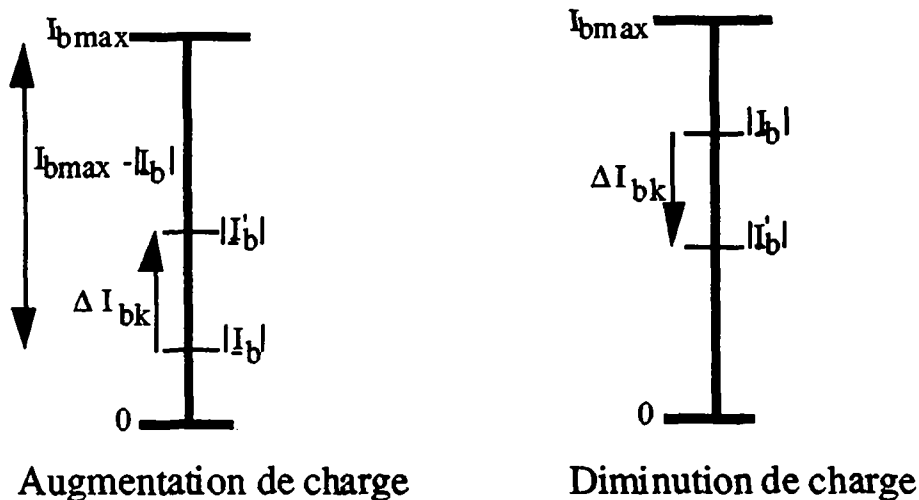


Figure 3.2: Définition du coefficient de marge de courant α_{bk}

Numériquement, le coefficient de marge est défini de la manière suivante :

$$m\alpha_{bk} = \frac{|\underline{I}_b'| - |\underline{I}_b|}{I_{bmax} - |\underline{I}_b|} \quad (3.7)$$

- \underline{I}_b' : Courant dans la branche b après le déclenchement de la branche k.
 \underline{I}_b : Courant dans la branche b avant le déclenchement de la branche k.
 I_{bmax} : Limite thermique admissible par la branche b.
 $m\alpha_{bk}$: Coefficient de marge de courant pour la branche b suite au déclenchement de la branche k.

Si $|\underline{I}_b| < I_{bmax}$

$m\alpha_{bk} > 1$: La branche b est surchargée suite au déclenchement de la branche k.

$m\alpha_{bk} < 0$: La branche b se décharge suite au déclenchement de la branche k.

Si $|\underline{I}_b| > I_{bmax}$

$m\alpha_{bk} > 0$: La branche b se décharge suite au déclenchement de la branche k.

$m\alpha_{bk} < 0$: La branche b se charge suite au déclenchement de la branche k.

Cette deuxième situation pour le coefficient de marge de courant peut être utilisée pour déterminer quelles sont les branches qui, une fois déclenchées, diminuent la charge d'une branche b. En effet, il peut être intéressant de déterminer la possibilité de supprimer une surcharge en effectuant simplement une modification topologique. Il suffit de considérer la variation de marge de courant suite au déclenchement de chacune des branches k pour la branche b et de retenir uniquement les branches qui créent des variations de marge de courant négatives.

3.3.2. Evaluation des contingences simples

La première utilisation possible de la base de connaissances consiste à évaluer les contingences simples du réseau considéré autour d'un point de fonctionnement voisin du point pour lequel la base de connaissances a été établie. Une estimation du courant dans les branches du réseau, suite au déclenchement de la branche k, est obtenue à l'aide de la relation (3.8) où le vecteur des courants \underline{I} est obtenu à l'aide d'un estimateur d'état du réseau.

$$\underline{I}' = \underline{I} + \underline{I}_k \cdot [\alpha_k] \quad (3.8)$$

\underline{I}' : Vecteur des courants du réseau suite au déclenchement de la branche k.

\underline{I} : Vecteur des courants du réseau avant le déclenchement de la branche k.

\underline{I}_k : Courant dans la branche k.

α_k : Vecteur des coefficients d'influence de courant associé à la branche k.

Le temps de calcul pour obtenir l'état du réseau, suite à un déclenchement, est considérablement réduit car il suffit d'effectuer une multiplication et une addition pour obtenir une estimation du

courant qui traverse une branche b suite au déclenchement de la branche k . De plus, il est possible de paralléliser très facilement chacune des opérations car l'estimation du courant dans une branche b est indépendante du courant qui circule dans les autres branches. Il est également possible de réduire le nombre de multiplications en considérant uniquement les variations de marge de courant supérieures à un seuil fixé.

3.3.3. Evaluation des contingences doubles

La deuxième utilisation possible de la base de connaissances consiste à évaluer les transits de courant pour les contingences doubles du réseau considéré au point de fonctionnement pour lequel la base de connaissances a été établie. Le problème consiste à déterminer les contingences pour lesquelles il est possible d'appliquer le principe de superposition.

Le principe de superposition est appliqué pour le tableau des coefficients d'influence de courant dans tous les cas où les deux branches déclenchées ne s'influencent pas mutuellement. Pour les deux branches coupées k et l , le principe de superposition est appliqué si α_{kl} et α_{lk} sont négligeables, c'est-à-dire si la variation de marge de courant associée à chacun des deux coefficients d'influence de courant est inférieure à un seuil donné. Le cas se présente si le déclenchement de la branche l n'influence pas la marge de courant de la branche k et, réciproquement, le déclenchement de la branche k n'influence pas la marge de courant de la branche l . Le principe de superposition est appliqué dans tous les cas où cette condition est observée. Dans les autres cas où l'un des deux (ou les deux) coefficients d'influence est non négligeable, il est nécessaire d'avoir recours au calcul de répartition de puissance. Le courant dans la branche b suite au déclenchement des branches k et l est défini de la manière suivante:

- α_{kl} et α_{lk} sont négligés -> Le principe de superposition est appliqué.

Calcul du courant dans le réseau suite au déclenchement des branches k et l .

Calcul de $\Delta \mathbf{I}_k$ en appliquant (3.6).

Calcul de $\Delta \mathbf{I}_l$ en appliquant (3.6).

$$\mathbf{I}' = \mathbf{I} + \Delta \mathbf{I}_k + \Delta \mathbf{I}_l \quad (3.9)$$

\mathbf{I}' : Vecteur des courants suite au déclenchement des branches k et l .

\mathbf{I} : Vecteur des courants obtenu à l'aide d'un estimateur d'état pour la situation initiale.

$\Delta \mathbf{I}_k$: Vecteur des écarts de courant du réseau suite au déclenchement de la branche k .

$\Delta \mathbf{I}_l$: Vecteur des écarts de courant du réseau suite au déclenchement de la branche l .

- α_{kl} et α_{lk} ne sont pas négligés -> Il est nécessaire d'effectuer un calcul de répartition de puissance

A nouveau, l'avantage principal de cette approche est de permettre la réduction du temps de calcul nécessaire pour déterminer l'état du réseau suite à une contingence double. De manière

générale, le nombre de contingences pour lesquelles le principe de superposition n'est pas applicable reste faible. De manière à illustrer l'approche proposée et évaluer ses performances, le paragraphe suivant traite un cas réel en considérant le réseau décrit au paragraphe 6.3.5.1.

3.4. Mise en œuvre de l'approche proposée

Afin de pouvoir déterminer les coefficients d'influence de courant négligeables, il est nécessaire de choisir un seuil maximal pour les coefficients de marge de courant. Le choix de ce seuil doit être effectué en consultant l'allure de l'histogramme de la figure 3.3 représentant la distribution des coefficients de marge de courant. Il est obtenu pour la période d'hiver heure pleine (cf. section 6.3.5.1). L'histogramme représente la proportion des coefficients d'influence de courant α_{bk} associés à un coefficient de marge de courant $m\alpha_{bk}$ donné. En considérant cet histogramme et en fixant un seuil de tolérance de 10%, 2.88% (2.5% + 0.28% + 0.1%) de tous les coefficients du tableau d'influence de courant sont conservés. Cela signifie que 2.88% des coefficients α_{bk} causent une variation de charge plus grande que 10% de la marge initiale de courant. Ceci bien entendu pour le point de fonctionnement considéré.

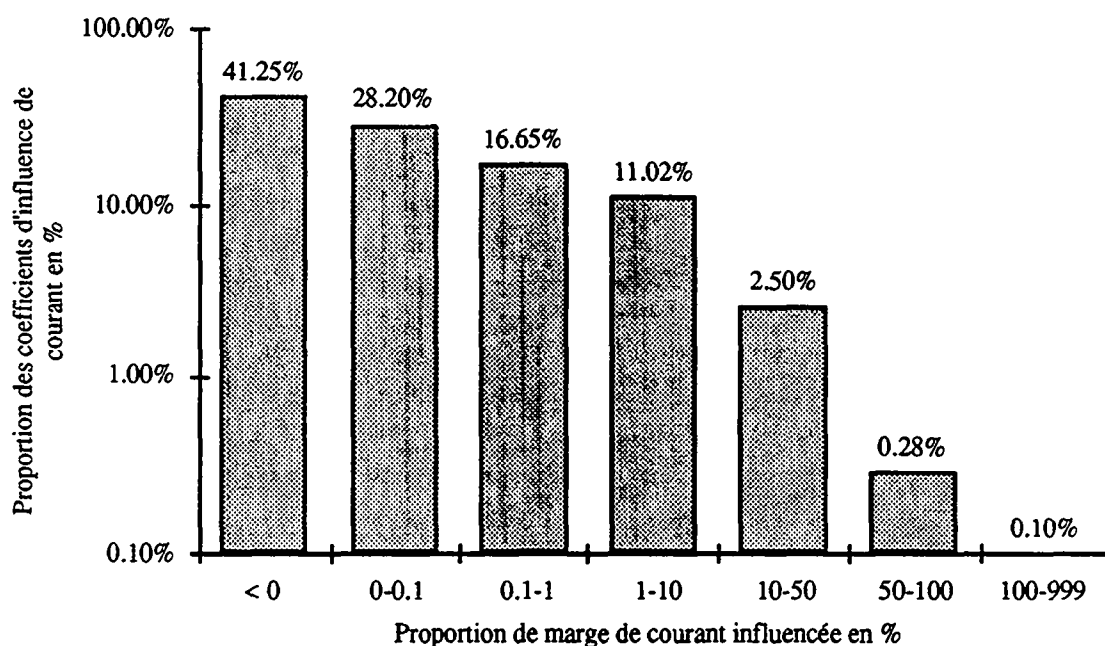


Figure 3.3: Histogramme des coefficients d'influence de courant

En conservant les coefficients pour lesquels la marge de courant respective est plus grande qu'un seuil fixé à 10%, il est possible d'illustrer la méthode proposée en exécutant deux types différents d'analyse de sécurité.

- Analyse de sécurité N-1 avec modification des charges et productions en utilisant le tableau réduit des coefficients d'influence de courant.

- Analyse de sécurité N-2 en utilisant le tableau d'influence complet au point de fonctionnement.

Les performances de cette approche seront analysées et discutées plus en détails au chapitre 6 dans le cadre de l'intégration de cette approche à l'intérieur du prototype du système expert réalisé.

3.4.1. Analyse de sécurité n-1 avec modification des charges et productions

Afin de pouvoir utiliser la même base de connaissances avec un autre cas de charge, il est nécessaire de connaître les limites d'utilisation de la base de connaissances autour du point de fonctionnement pour lequel elle a été établie. Pour le réseau considéré, toutes les charges et les productions du réseau ont été augmentées uniformément de 10% en valeur absolue.

Le tableau 3.1 indique le nombre et le pourcentage de contingences observées pour chacune des situations qui peuvent se présenter. La terminologie proposée à la section 4.2 est utilisée pour différencier une contingence active d'une contingence critique. Les déviations maximales observées entre les valeurs estimées et exactes sont de 0.3% pour les contingences qui ne sont pas identifiées comme actives. Ceci correspond à la mesure d'erreur de seconde espèce. Pour les contingences identifiées comme critiques alors qu'elles ne sont pas actives, cette même erreur est de 3% au maximum.

Tableau 3.1: Résultats de l'analyse de sécurité n-1

Type de cas	Nombre de cas	%
Contingence non active correctement détectée	141	53.2
Contingence active correctement détectée	67	25.3
Contingence active non détectée	4	1.5
Contingence critique détectée en trop	7	2.6
Etat du réseau inconnu*	46	17.4

* Tous ces cas correspondent soit à un état du réseau qui n'est pas connexe, soit à des cas où le calcul de répartition de puissance ne converge pas

La comparaison du temps nécessaire pour effectuer une analyse de sécurité n-1 avec un calcul de répartition de puissance et l'approche proposée indique un gain compris entre 70 à 100 fois plus rapide que l'approche classique. L'avantage de cette approche est également de garantir un temps de traitement de la contingence indépendant de la charge du réseau et de la contingence. Ce n'est bien entendu pas le cas pour un calcul traditionnel de répartition de puissance.

3.4.2. Analyse de sécurité n-2 au point de fonctionnement pour lequel la base de connaissances a été établie

Comme il a été expliqué au point 3.3.3, il n'est pas possible d'appliquer le principe de superposition pour toutes les contingences doubles. Pour le point de fonctionnement considéré, il est nécessaire d'effectuer 3.2%(1102) de tous les calculs de répartition de puissance auxquels il est nécessaire de procéder lors d'une approche traditionnelle de l'analyse de sécurité. Pour tous ces cas, 51.7% (570) conduisent à identifier une contingence critique. Le tableau 3.2 résume les résultats obtenus.

Tableau 3.2: Résultats de l'analyse de sécurité n-2

Type de cas	Nombre de cas	%
Contingence non active correctement détectée	16610	47.5
Contingence active correctement détectée	5925	16.9
Contingence active non détectée	79	0.2
Contingence critique détectée en trop	88	0.3
Principe de superposition non applicable	1102	3.2
Etat du réseau inconnu*	11176	31.9

* Tous ces cas correspondent soit à un état du réseau qui n'est pas connexe, soit à des cas où le calcul de répartition de puissance ne converge pas

Les contingences actives non détectées peuvent être analysées en considérant la déviation maximale entre la valeur estimée pour la branche la plus chargée et la valeur exacte obtenue à l'aide d'un calcul de répartition de puissance. Pour ces cas, la déviation maximale observée est de 3%. De la même manière, il est possible d'observer les résultats obtenus pour les contingences critiques en trop, c'est-à-dire les contingences qui ne sont pas actives en réalité. Pour ces cas, la déviation maximale est de 8%.

Finalement, la comparaison des temps nécessaires pour l'approche proposée et l'approche classique indique que la méthode proposée est 20 à 25 fois plus rapide que l'approche classique.

3.5. Extraction des règles

Ce paragraphe et les suivants discutent de la deuxième utilisation de la base de connaissances, c'est-à-dire l'extraction de règles. L'extraction de règles se base principalement sur la similitude observée entre les coefficients d'influence pour un même déclenchement dans le cas de différents régimes de fonctionnement. Après avoir présenté une interprétation des coefficients d'influence de courant, cette section indique la manière d'observer des similitudes pour un déclenchement dans le cas de différents régimes de fonctionnement caractéristiques du réseau considéré.

3.5.1. Mesure de similitude des coefficients d'influence de courant

En considérant différents régimes de fonctionnement caractéristiques d'un réseau électrique et en reportant sur un graphique le coefficient d'influence de courant α_{bk} pour chaque branche lors d'un déclenchement, il apparaît clairement que l'allure des courbes est semblable pour les différents régimes de fonctionnement. De manière à pouvoir caractériser le comportement d'un réseau pour un déclenchement donné, une mesure de similitude est appliquée. Considérons, pour l'influence du déclenchement de la branche k , deux points de fonctionnement différents pour le réseau utilisés auxquels sont associés les deux vecteurs des coefficients d'influence de courant (α_k) X et Y . En calculant le coefficient de corrélation ρ_{xy}^k pour les deux vecteurs X et Y , on obtient une mesure de similitude de ces deux vecteurs. Cette mesure est définie de la manière suivante :

$$\bar{x} = \frac{1}{B} \sum_{i=1}^B x_{ik} \quad (3.11)$$

$$\bar{y} = \frac{1}{B} \sum_{i=1}^B y_{ik} \quad (3.12)$$

- X : Vecteur des coefficients d'influence de courant associés au premier point de fonctionnement considéré.
- Y : Vecteur des coefficients d'influence de courant associés au deuxième point de fonctionnement considéré.
- x_{ik} : Coefficient d'influence de courant pour la branche i en considérant le déclenchement de la branche k pour le premier point de fonctionnement considéré.
- y_{ik} : Coefficient d'influence de courant pour la branche i en considérant le déclenchement de la branche k pour le deuxième point de fonctionnement considéré.
- B : Nombre de branches du réseau considéré

$$\rho_{xy}^k = \frac{\sum_1 (x_{ik} - \bar{x})(y_{ik} - \bar{y})}{\sqrt{\sum_1 (x_{ik} - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_1 (y_{ik} - \bar{y})^2}} \quad i \in [1, B] \quad (3.13)$$

De manière générale, plus le coefficient de corrélation ρ_{xy}^k est proche de un, plus la dépendance linéaire entre X et Y est forte. Par contre dans le cas où ρ_{xy}^k est nul, il n'a aucune liaison du premier degré entre X et Y . Pour les réseaux considérés, le nombre n des couples d'observation (x_{ik}, y_{ik}) est élevé pour un réseau de transport. Il est par conséquent possible de regrouper les différentes branches du réseau par zones dont les branches ont les mêmes propriétés électriques. Par exemple, toutes les lignes qui se trouvent au même niveau de tension ou tous les transformateurs.

3.5.2. Prétraitement des coefficients d'influence de courant

Pour m régimes caractéristiques de fonctionnement d'un réseau pour chacun desquels une base de connaissances a été établie, il est possible de calculer $m(m-1)/2$ coefficients d'intercorrélation. Lors d'un déclenchement donné, il arrive que pour un régime de fonctionnement le comportement du réseau soit différent. Ceci se produit par exemple lorsque la charge de la branche déclenchée est très faible en comparaison des autres régimes de fonctionnement. Ce cas se manifeste également par une variation de la marge de courant très faible en regard de celles observées pour le même déclenchement dans le cas d'autres régimes caractéristiques de fonctionnement du réseau. Pour ces cas, il apparaît un grand nombre de coefficients d'influence de courant parasites. Les coefficients d'influence de courant qui ne contribuent pas de manière significative à une modification de la charge des autres branches sont des coefficients importants en valeur absolue, mais pour lesquels la variation de marge de courant correspondante peut être considérée comme nulle. De manière à obtenir un ensemble de coefficients d'intercorrélation semblables entre eux, il convient d'effectuer un prétraitement. Celui est obtenu en considérant le critère de la marge de courant.

Définition du prétraitement

Soit le déclenchement de la branche k . Considérons l'influence du déclenchement de la branche k sur la branche b pour m régimes de fonctionnement du réseau. Le filtre est défini de la manière suivante :

- SI au moins l'un des coefficients de marge $m\alpha_{bk}$ pour les m régimes caractéristiques est supérieur à un seuil fixé, ALORS les m coefficients d'influence de courant associés à la branche b sont pris en compte pour les calculs d'intercorrélation.
- SI tous les coefficients de marge de courant associés à la branche b sont inférieurs au seuil prescrit, ALORS les m coefficients d'influence de courant peuvent être négligés pour l'influence du déclenchement de la branche k sur la branche b .

m : Nombre de régimes de fonctionnement caractéristiques du réseau

Lim_f : Valeur limite inférieure du coefficient de marge de courant $m\alpha_{bk}$ pour considérer la variation de marge de courant comme négligeable.

α'_{bk} : coefficient de courant de la branche b après filtrage pour le déclenchement k

$$\begin{cases} \alpha'_{bk} = 0 & \text{Si } \forall m \ m\alpha_{bk} < \text{Lim}_f \\ \text{Autrement } \forall m \ \alpha'_{bk} = \alpha_{bk} \end{cases}$$

3.5.3. Interprétation des coefficients d'intercorrélation pour extraire des règles

Une fois les différents coefficients d'intercorrélation calculés pour un déclenchement, il est possible d'interpréter les résultats obtenus pour extraire des règles propres à chaque déclenchement.

De manière générale, les règles présentées ci-dessous peuvent être classées en deux groupes. Le premier groupe permet de déterminer le comportement du réseau pour le déclenchement d'une branche. Ces règles déterminent si le réseau se comporte de manière semblable pour les différents points de fonctionnement considérés et la contingence analysée. Le second comprend une série de règles utilisées pour déterminer l'état du réseau suite à un déclenchement. Ce deuxième groupe de règles vise à extraire la partie du réseau influencée par la contingence. Les règles s'appliquent soit à la totalité des branches du réseau, soit à des entités provenant de la répartition des branches en zones significatives. Par exemple, le regroupement des lignes au même niveau de tension, les transformateurs, les équivalents externes du réseau.

- m : Nombre de régimes de fonctionnement caractéristiques du réseau
- p : Nombre de coefficients d'intercorrélation $p = m(m-1)/2$
- z : Nombre de zones
- B : Nombres de branches du réseau
- k : Numéro de la branche déclenchée

Lim_a : Valeur limite inférieure du coefficient d'intercorrélation pour considérer les deux états comme semblables.

Lim_f : Valeur limite inférieure du coefficient de marge $m\alpha_{bk}$ pour considérer la variation de marge de courant comme négligeable.

ρ_{ij}^{hk} : Coefficient d'intercorrélation pour la zone h dans le cas des régimes de fonctionnement i et j.

ρ_{ij}^{Bk} : Coefficient d'intercorrélation pour toutes les branches du réseau dans le cas des régimes de fonctionnement i et j.

Une fois les branches regroupées en zones, il suffit de calculer pour chaque zone et pour l'ensemble des branches les différents coefficients d'intercorrélation en considérant les conditions suivantes :

$$\begin{array}{l}
 i \in [1..m] \\
 j \in [1..m] \\
 h \in [1..z]
 \end{array}
 \left\{ \begin{array}{l}
 \cdot i \neq j \\
 \cdot \rho_{ij}^{hk} = \rho_{ji}^{hk} \\
 \cdot \rho_{ij}^{Bk} = \rho_{ji}^{Bk}
 \end{array} \right.$$

3.5.3.1. Règles pour déterminer le comportement du réseau lors d'une contingence

Règle 1

Soit la zone h et le déclenchement k

$$\text{SI } \rho_{ij}^{hk} = 0 \quad \forall i,j,i \neq j \quad \text{ou } \rho_{ij}^{hk} > \text{Lim}_a \quad \forall i,j,i \neq j$$

ALORS les coefficients d'influence de courant sont semblables pour le déclenchement k dans le cas de la zone h pour les m régimes de fonctionnement caractéristiques du réseau.

Règle 2

Soit l'ensemble des B branches du réseau et le déclenchement k

$$\text{SI } \rho_{ij}^{Bk} = 0 \quad \forall i,j,i \neq j \quad \text{ou } \rho_{ij}^{Bk} > \text{Lim}_a \quad \forall i,j,i \neq j$$

ALORS les coefficients d'influence de courant sont semblables pour le déclenchement k et les m différents régimes de fonctionnement caractéristiques du réseau.

Règle 3

Soit l'ensemble des B branches du réseau et le déclenchement k

$$\text{SI } \text{lors du calcul des } \rho_{ij}^{Bk} \quad \forall i,j,i \neq j, \quad \exists \text{ un point de fonctionnement du réseau } s \in [1..m] \text{ tel}$$

$$\text{que } 0 < \rho_{sj}^{Bk} < \text{Lim}_a$$

ALORS le réseau se comporte de manière différente pour le déclenchement k dans le cas du régime s.

3.5.3.2. Règles pour déterminer les conséquences d'une contingence sur l'état du réseau

Ce second groupe de règles est appliqué à la zone h dans le cas où une règle du premier groupe a pu être appliquée avec succès.

Règle 4

Soit la zone h où $h \in [1..z]$ et le déclenchement k

$$\text{SI } \rho_{ij}^{hk} = 0 \quad \forall i,j,i \neq j$$

ALORS la zone h n'est pas influencée par le déclenchement k pour les m régimes de fonctionnement caractéristiques du réseau.

Règle 5

Soit la zone h où $h \in [1..z]$ et le déclenchement k

$$\text{Si } \rho_{ij}^{hk} = 0 \quad \forall i,j,h,i \neq j \quad \text{où } h \in [1..z]$$

ALORS l'influence du déclenchement k est négligeable pour les m régimes de fonctionnement caractéristiques du réseau.

Règle 6

Soit la zone h où $h \in [1..z]$ et le déclenchement k

$$\text{SI } \rho_{ij}^{hk} > \text{Lim}_a \forall i,j,i \neq j$$

ALORS le déclenchement k influence la zone h pour les m régimes de fonctionnement caractéristiques du réseau.

Règle 7

Soit l'ensemble des B branches du réseau et le déclenchement k

$$\text{Si } \exists m \alpha_{bk} > 1 \quad \forall m \text{ et } |I_b| < I_{b\max}$$

ALORS le réseau n'est pas sûr pour le déclenchement k .

D'autres règles peuvent être extraites à partir de l'analyse de la variation de marge de courant. Elles correspondent à des particularités propres au réseau considéré.

3.6. Utilisation des règles

Le propos de ce paragraphe est d'indiquer les principales utilisations possibles des règles énoncées ci-dessus.

La première utilisation consiste à vérifier la possibilité d'utiliser le tableau d'influence pour la contingence considérée. Il convient de ne pas utiliser les coefficients d'influence si les coefficients de corrélation obtenus pour les différents régimes de fonctionnement ne sont pas semblables.

La deuxième utilisation consiste à considérer l'état du réseau et à déterminer s'il est sûr ou non sûr, suite à un déclenchement. Pour certains déclenchements, il est possible de déterminer l'état du réseau. Pour les autres déclenchements, il est possible de déterminer les branches proches des limites d'exploitation en considérant les coefficients de courant pour la partie du réseau influencée par le déclenchement.

La troisième utilisation de ces règles consiste à déterminer la partie du réseau qui est insensible à un déclenchement. Il est ainsi possible de résoudre le calcul de répartition de puissance pour la partie du réseau influencée par le déclenchement.

3.6.1. Application des règles

De manière à illustrer les règles proposées, quelques déclenchements sont considérés pour le réseau électrique présenté à la section 6.3.5.1. Le propos de cette application n'est pas de donner une synthèse de toutes les règles qu'il est possible d'associer à chacun des déclenchements, mais plutôt de présenter quelques exemples de déclenchements pour lesquels les règles décrites précédemment sont appliquées.

Pour chacun des quatre déclenchements présentés ci-dessous, les coefficients d'influence de courant et les coefficients de marge de courant sont représentés pour les branches et les régimes de fonctionnement considérés. La légende sur la partie gauche de l'axe des ordonnées correspond à la courbe en trait plein noir et représente le module des coefficients de courant α_{bk} . La légende sur la partie droite de l'axe des ordonnées est associée aux coefficients de marge de courant $m\alpha_{bk}$ qui correspondent à la courbe en trait plein gris (axe des ordonnées décalé).

Les valeurs suivantes sont considérées pour l'ensemble des déclenchements présentés :

$$\text{Lim}_a = 0.9$$

$$\text{Lim}_f = 0.1$$

Lim_a : Valeur limite inférieure du coefficient d'intercorrélation pour considérer les deux états comme semblables.

Lim_f : Valeur limite inférieure du coefficient de marge $m\alpha_{bk}$ pour considérer la variation de marge de courant comme négligeable.

Cinq différentes zones électriques sont définies. Chacune d'elles est indiquée sur les figures en utilisant un trait vertical. Toutes les branches comprises entre deux traits verticaux appartiennent à la même zone électrique.

Zone 1 : Toutes les branches du réseau électrique au niveau de tension 380 KV.

Zone 2 : Toutes les branches du réseau électrique au niveau de tension 220 KV.

Zone 3 : Toutes les branches du réseau électrique au niveau de tension 125 KV.

Zone 4 : Toutes les branches du réseau électrique qui lui sont externes et qui sont au niveau de tension 380 KV.

Zone 5 : Tous les transformateurs du réseau électrique.

a) Déclenchement d'une branche 380KV

La comparaison des deux figures 3.4 et 3.5 souligne l'effet du prétraitement présenté au paragraphe 3.5.2

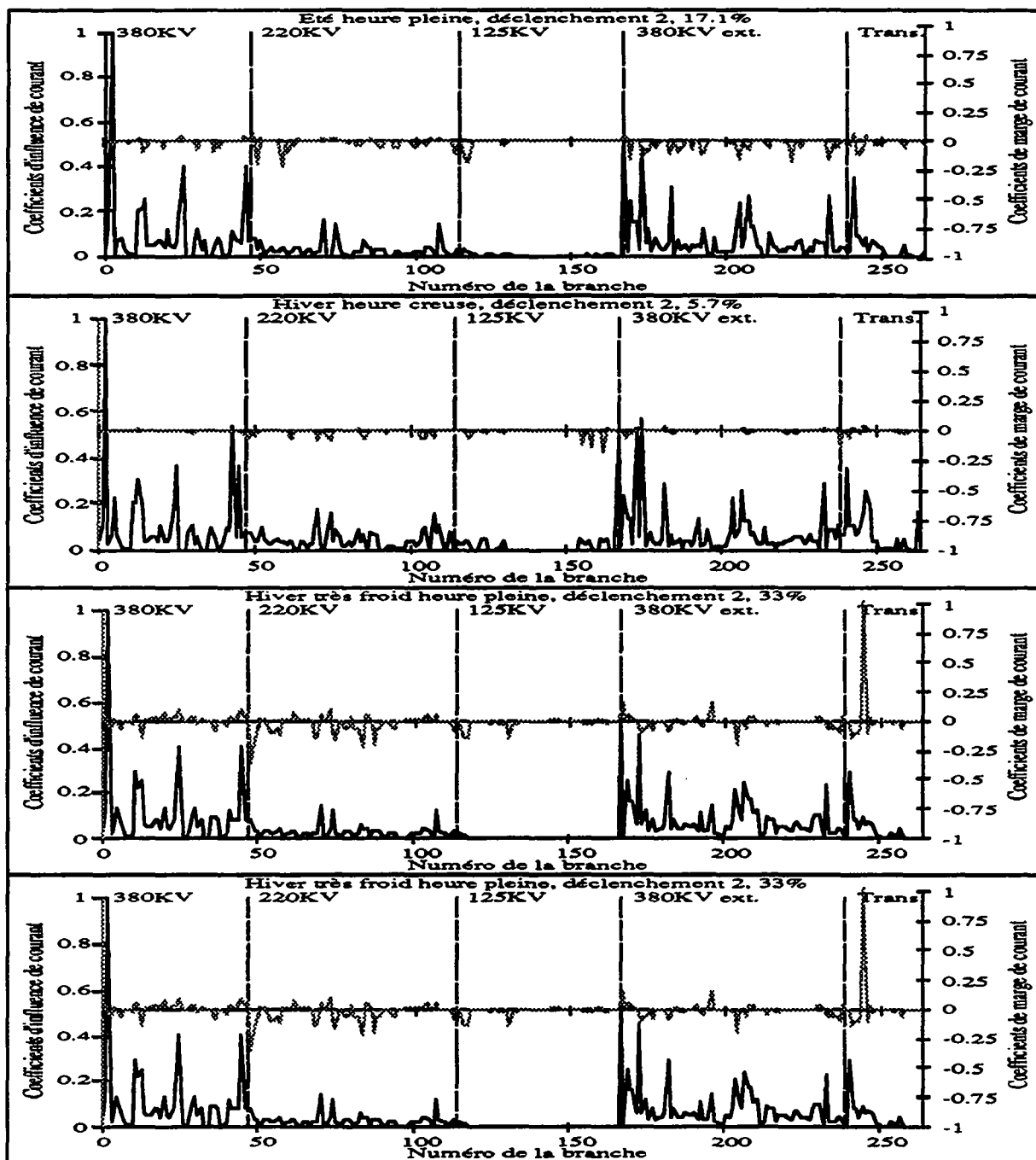


Figure 3.4: Coefficients d'influence de courant et coefficients de marge de courant pour le déclenchement de la ligne 2 avant filtrage.

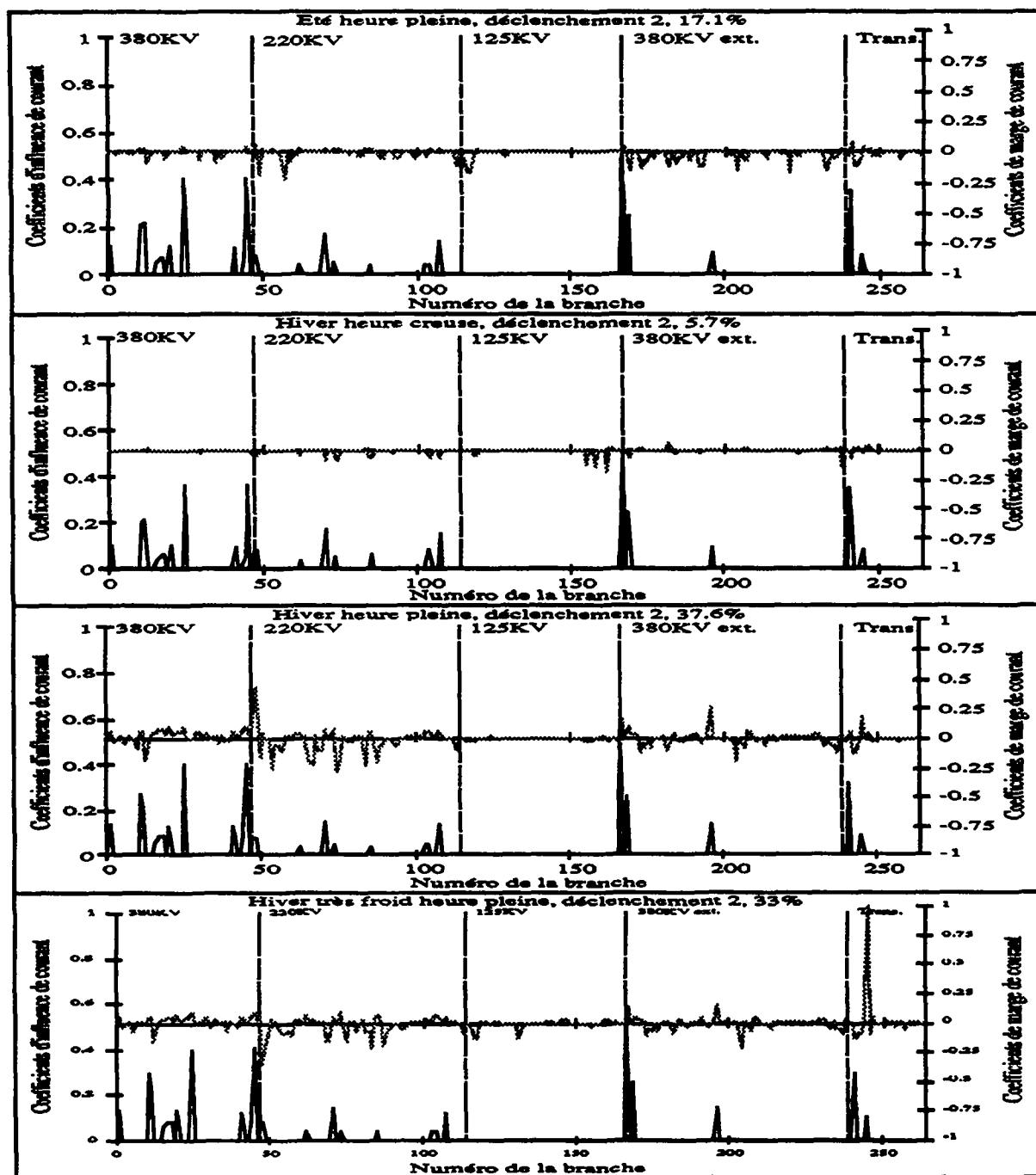


Figure 3.5: Coefficients d'influence de courant et coefficients de marge de courant pour le déclenchement de la ligne 2 après filtrage.

Tableau 3.3: Coefficients d'intercorrélation pour le déclenchement de la ligne 2

Fichiers	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4	Zone 5	Toutes
e hp - h hc	0.991	0.968	1	0.9	0.937	0.931
e hp - h hp	0.996	0.999	0.98	0.998	0.993	0.996
e hp - t hp	0.993	0.993	0.919	0.996	0.983	0.992
h hc - h hp	0.986	0.969	0.983	0.894	0.937	0.925
h hc - t hp	0.985	0.964	0.926	0.893	0.976	0.924
h hp - t hp	0.999	0.996	0.979	1	0.982	0.998

- La règle 1 est vraie pour chacune des zones.
- La règle 2 est vraie pour chacun des m régimes de fonctionnement.
- La règle 6 est vraie pour chacune des zones.

Synthèse: Les coefficients d'influence de courant sont semblables pour les m régimes de fonctionnement. L'ensemble des zones est affectée par le déclenchement, c'est-à-dire qu'il existe pour chacune des zones au moins une branche dont la marge de courant varie de plus de 10%.

b) Déclenchement du transformateur 250 au niveau de tension 125KV

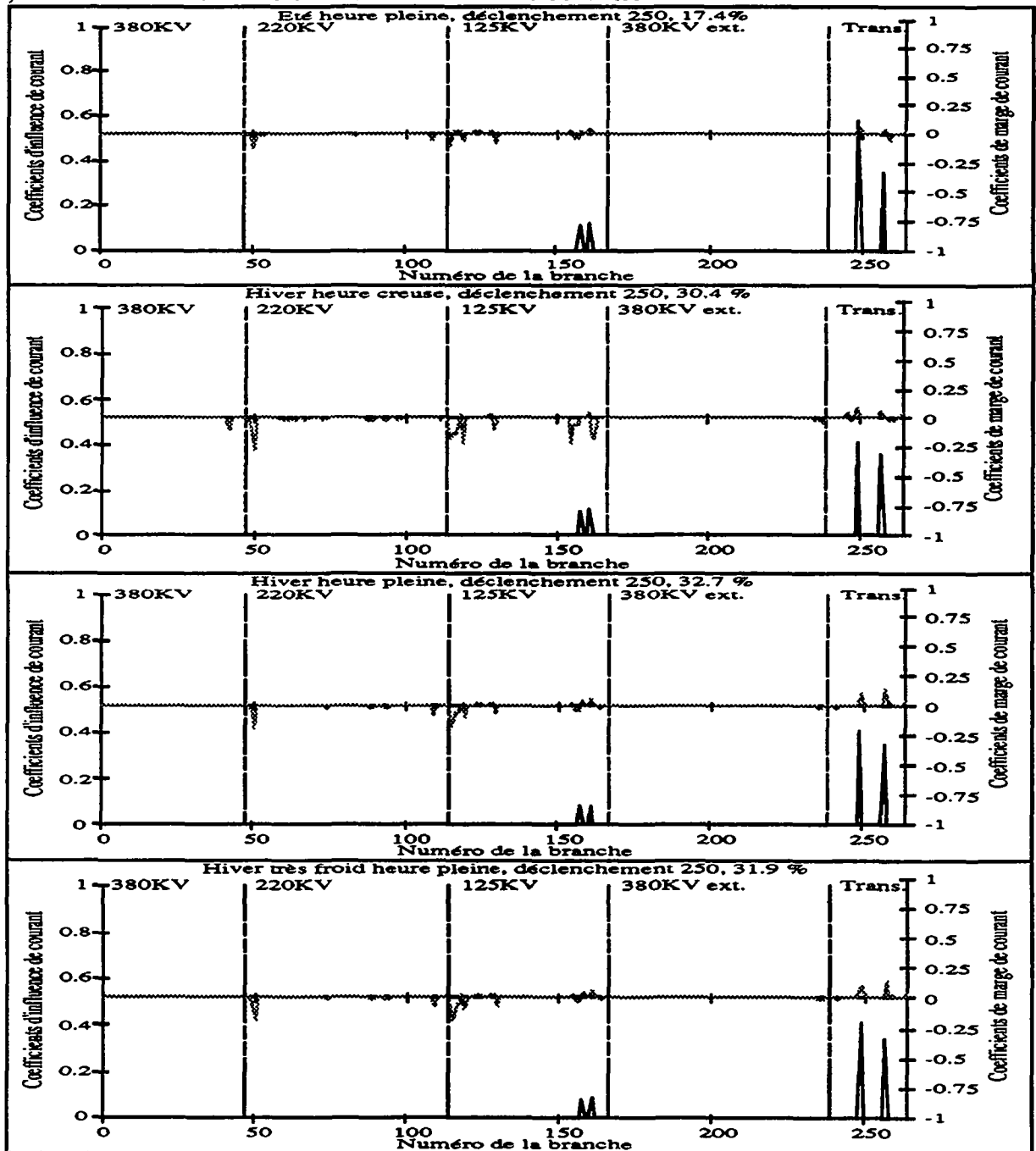


Figure 3.6: Coefficients d'influence de courant et coefficients de marge de courant pour le déclenchement du transformateur 250 après filtrage.

Tableau 3.4: Coefficients d'intercorrélation pour le déclenchement du transformateur 250

Fichiers	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4	Zone 5	Toutes
ehp - hhc	0	0.999	1	0	0.982	0.985
ehp - hhp	0	1	0.994	0	0.987	0.998
ehp - thp	0	0.996	0.989	0	0.996	0.992
hhc- hhp	0	0.998	0.994	0	1	0.998
hhc- thp	0	0.996	0.990	0	0.995	0.994
hhp- thp	0	0.995	0.998	0	0.997	0.996

- La règle 1 est vraie pour chacune des zones.
- La règle 2 est vraie pour chacun des m régimes de fonctionnement.
- La règle 4 est vraie pour les zones 1,4.
- La règle 6 est vraie pour les zones 2,3,5.

Synthèse: Les coefficients d'influence de courant sont semblables pour les m régimes de fonctionnement. Le déclenchement du transformateur influence les différents niveau de tension à l'exception du réseau externe à 380KV.

c) Déclenchement de la ligne 54 au niveau de tension 220KV

Tableau 3.5: Coefficients d'intercorrélation pour le déclenchement de la ligne 54

Fichiers	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4	Zone 5	Toutes
ehp - hhc	0	1	0	0	0	1
ehp - hhp	0	1	0	0	0	1
ehp - thp	0	1	0	0	0	1
hhc- hhp	0	1	0	0	0	1
hhc- thp	0	1	0	0	0	1
hhp- thp	0	1	0	0	0	1

- La règle 1 est vraie pour chacune des zones.
- La règle 2 est vraie pour chacun des m régimes de fonctionnement.
- La règle 4 est vraie pour les zones 1,3,4,5.
- La règle 6 est vraie pour la zone 2.

Synthèse: Les coefficients d'influence de courant sont semblables pour les m régimes de fonctionnement. Le déclenchement de la ligne 54 influence uniquement le niveau de tension auquel il appartient, c'est-à-dire le niveau de tension 220KV.

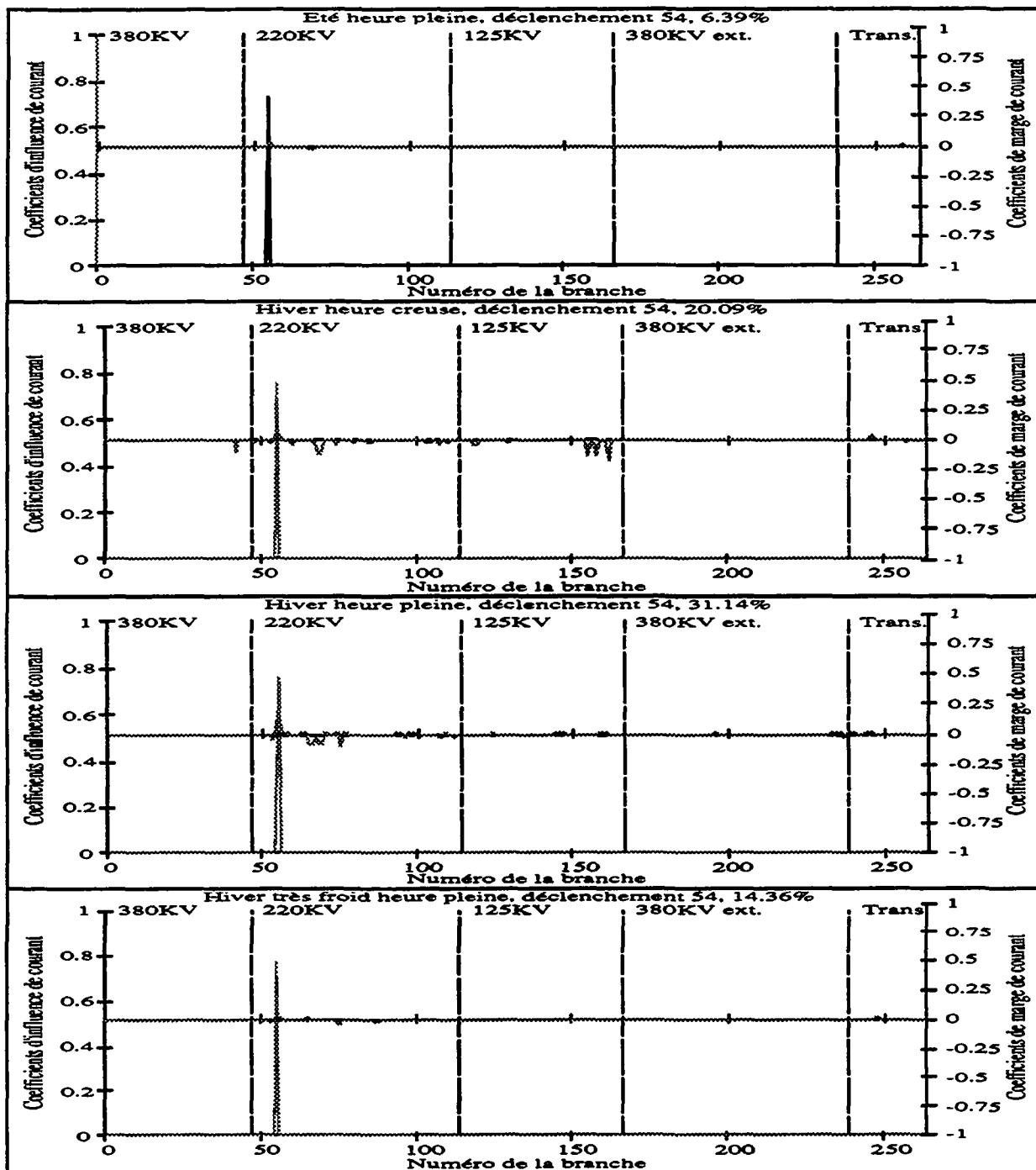


Figure 3.7: Coefficients d'influence de courant et coefficients de marge de courant pour le déclenchement de la ligne 54 après filtrage.

d) Déclenchement de la ligne 210 au niveau de tension 380KV

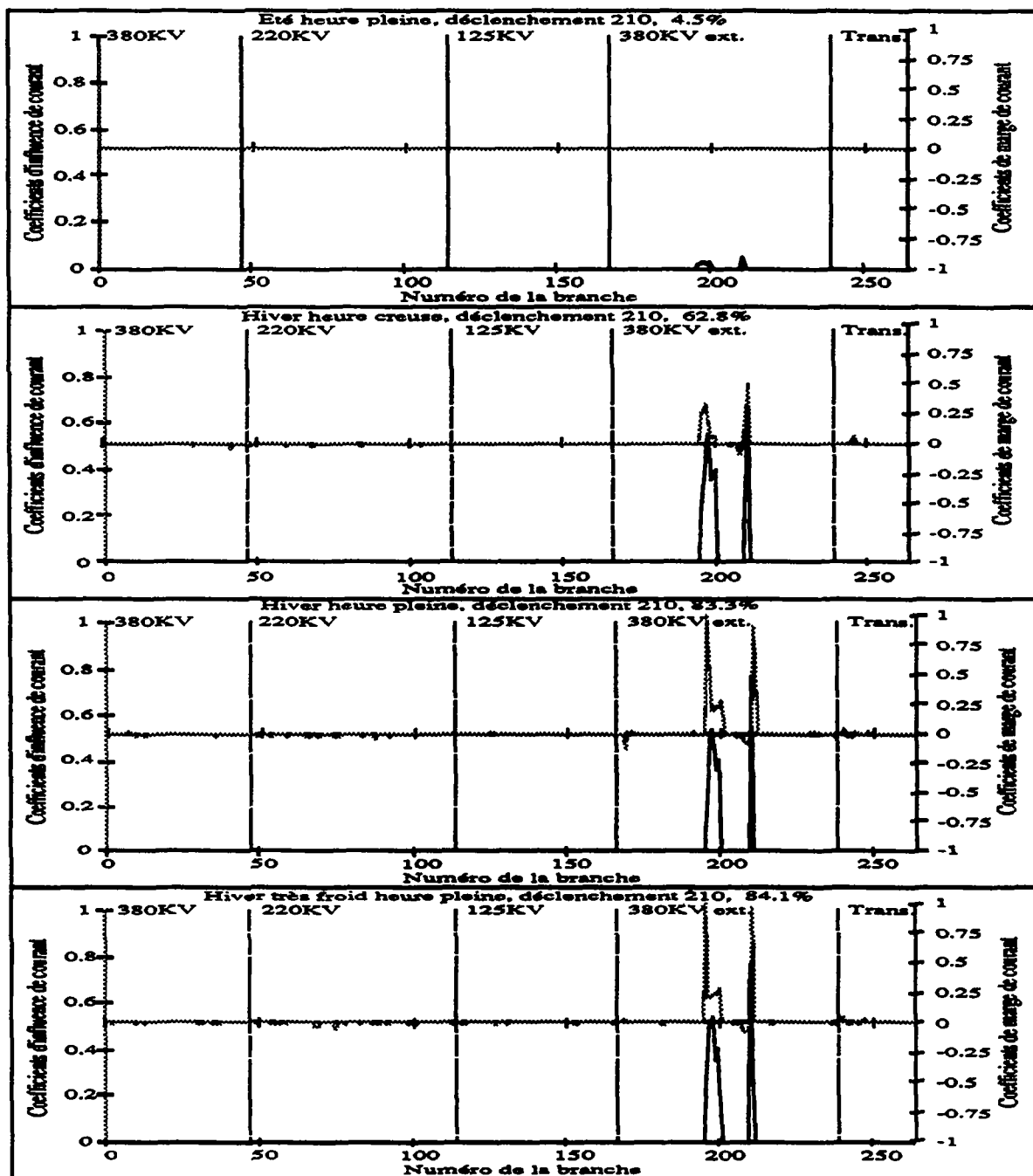


Figure 3.8: Coefficients d'influence de courant et coefficients de marge de courant pour le déclenchement de la ligne 210 après filtrage.

Tableau 3.6: Coefficients d'intercorrélation pour le déclenchement de la ligne 210

Fichiers	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4	Zone 5	Toutes
ehp - hhc	0	0	0	1	0	1
ehp - hhp	0	0	0	1	0	1
ehp - thp	0	0	0	1	0	1
hhc- hhp	0	0	0	1	0	1
hhc- thp	0	0	0	1	0	1
hhp- thp	0	0	0	1	0	1

- La règle 1 est vraie pour chacune des zones.
- La règle 2 est vraie pour chacun des m régimes de fonctionnement.
- La règle 4 est vraie pour les zones 1,2,3,5.
- La règle 6 est vraie pour la zone 4.

Synthèse: Les coefficients d'influence de courant sont semblables pour les m régimes de fonctionnement et ceci également pour le régime de fonctionnement été heure pleine. Pour cette situation, la charge de la branche déclenchée est cependant faible. Le déclenchement de la ligne 210 influence uniquement le niveau de tension auquel elle appartient, c'est-à-dire le niveau de tension 380KV externe.

3.7. Conclusion

Ce chapitre présente une nouvelle méthode pour estimer la charge des branches suite à une contingence. La méthode utilise les résultats d'une analyse systématique des contingences simples effectuée en temps différé. En effectuant un calcul de répartition de puissance pour chacune des contingences simples, une base de connaissances est établie. Elle est constituée d'un ensemble de vecteurs de coefficients de courant, dont chacun d'eux est associé à un déclenchement. Un critère basé sur les marges de courant indique que seul un petit nombre de ces coefficients influence de manière significative la marge de courant pour un déclenchement donné. Une première utilisation de la base de connaissances est proposée pour l'estimation des transits dans les branches du réseau suite à une contingence simple ou double. Pour une contingence double, l'estimation est basée sur l'utilisation du principe de superposition.

Les performances de cette approche ont été évaluées pour un réseau de transport fortement maillé. Il y a environ 3% des coefficients α_{bk} qui influencent la marge de courant de plus de 10%. Les résultats obtenus pour une analyse des contingences simples et doubles démontrent l'intérêt de l'approche proposée en ce qui concerne le gain de temps et la précision des résultats obtenus. L'approche proposée permet d'obtenir un gain rapporté à l'approche classique de l'ordre de 70 à 100 pour les contingences simples et 20 à 25 pour les contingences doubles. La diminution du gain pour les contingences doubles s'explique en considérant les contingences pour lesquelles il n'est pas possible d'appliquer le principe de superposition. Il est alors nécessaire d'effectuer un calcul de répartition de puissance pour ces contingences. Cependant le nombre de contingences pour lesquelles il n'est pas possible d'appliquer le principe de

superposition reste faible. Il est de l'ordre de 3% pour le régime de fonctionnement considéré (hiver heure pleine).

Une seconde utilisation est proposée pour extraire des règles à partir de la base de connaissances constituée pour différents points de fonctionnement. Les règles extraites sont obtenues sur la base de l'analyse des coefficients d'intercorrélation pour un déclenchement donné en considérant différentes zones électriques. L'intérêt de ces règles est de pouvoir exploiter toutes les bases de connaissances établies pour différents points de fonctionnement du réseau considéré. L'utilisation de ces règles permet, par exemple, de déterminer les déclenchements pour lesquels il est possible d'utiliser les tableaux des coefficients d'influence de courant.

Chapitre 4

Classement des contingences par ordre de sévérité

L'analyse de sécurité d'un réseau électrique en régime permanent exige d'une part, l'identification des contingences à analyser et d'autre part, l'analyse des contingences choisies. Les méthodes de classement des contingences s'inscrivent dans le contexte de la première tâche. L'objectif consiste à réduire le nombre de contingences à traiter à l'aide d'un calcul de répartition de puissance.

Le chapitre présente l'utilisation des méthodes de classement des contingences dans le cadre d'un système expert. La première partie traite des principes généraux des méthodes de classement des contingences; les facteurs qui influencent les performances des méthodes de classement sont analysés en considérant un cas de charge du réseau électrique présenté dans le chapitre 6 (cf. section 6.3.5.1). La seconde partie est consacrée à l'analyse des performances d'une méthode qui détermine en temps réel la valeur de l'indice de performance limite. La méthode présentée est basée sur l'utilisation des moindres carrés. Elle vise à identifier la valeur de l'indice de performance limite sans avoir à procéder au calcul systématique de cet indice de performance pour chacune des contingences lors d'une modification du point de fonctionnement du réseau.

4.1. Théorie des méthodes de classement des contingences

La sélection des contingences, potentiellement critiques pour la sécurité du réseau électrique, est effectuée en utilisant un indice de performance (PI). Celui-ci constitue une mesure de la sévérité de la contingence. La forme générale est la suivante [Hal84] :

$$PI_{m/k} = \sum_{i=1}^b w_i [f_i(z)]^m \quad (4.1)$$

- $f_i(z)$: Fonction linéaire de z_i qui correspond par exemple au quotient P_i / P_{imax} .
- w_i : Facteur de poids associé à la branche i .

- i : Numéro de la branche.
- k : Numéro de la contingence.
- b : Nombre de branches.
- m : Exposant entier.
- P_i : Puissance active transitant dans la branche i.
- P_{imax} : Puissance active maximale admissible dans la branche i.

Après avoir calculé l'indice de performance associé à chaque contingence, celles-ci sont classées dans l'ordre décroissant de la valeur de l'indice de performance. Les plus sévères se trouvent au sommet de la liste. Les contingences sont ensuite simulées à l'aide d'un calcul de répartition de puissance en parcourant la liste ordonnée dans l'ordre décroissant. Le problème consiste à déterminer un critère d'arrêt qui permette l'identification d'un maximum de contingences critiques sans avoir à toutes les analyser et tout en minimisant le nombre de fausses alarmes. En théorie, deux heuristiques principales sont proposées dans la littérature [Ver87]. La première consiste à poursuivre l'analyse de sécurité jusqu'à ce que l'analyse séquentielle des contingences ne conduise plus à une situation critique du réseau. La deuxième propose l'analyse des n premières contingences de la liste. Son utilisation nécessite une estimation du nombre de contingences critiques. De manière générale, le critère d'arrêt consiste à déterminer la valeur de l'indice de performance limite au delà de laquelle une contingence est considérée comme critique ou non.

Cependant, la mise en oeuvre des méthodes de classement des contingences présentées ci-dessus conduit le plus souvent à des résultats dont la qualité n'est pas aussi élevée que ne le laisserait supposer la simplicité de la théorie. La qualité des résultats obtenus dépend principalement du choix des paramètres utilisés pour le calcul de l'indice de performance.

4.2. Evaluation des performances des méthodes de classement des contingences.

L'objectif des méthodes de classement des contingences est de filtrer et classer les contingences sans que cela nécessite l'utilisation d'un calcul de répartition complet. De manière générale, il faut s'attendre à des erreurs de classement des contingences.

Une contingence est considérée comme active si elle conduit réellement à une surcharge. La décision est prise sur la base d'un calcul complet de répartition de puissance. Parallèlement, une contingence est dite critique si elle est considérée, par la méthode employée, comme conduisant à une situation d'alerte du réseau.

Cependant, des contingences actives peuvent être classées comme non critiques. Cette situation correspond au risque de deuxième espèce en statistique. Inversement, des contingences non actives peuvent être considérées comme critiques. Ceci correspond à une fausse alarme et, en statistique, au risque de première espèce. En choisissant une forme d'indice de performance appropriée et un ensemble de paramètres cohérents, il est possible de minimiser le risque de première et de seconde espèce. L'algorithme général d'une méthode utilisée pour la validation d'un classement des contingences est représentée à la figure 4.1.

Il est nécessaire de disposer d'outils pour estimer la qualité des résultats obtenus en modifiant les différents paramètres utilisés par un indice de performance. La littérature propose diverses mesures pour estimer les performances des méthodes de classement. Les mesures utilisées dans le cadre de cette étude sont issues de [Lo88] et [Ver87]. Il faut distinguer deux approches essentielles : d'une part, l'approche graphique [Ver87] permet de caractériser l'exactitude de l'ordonnement des contingences dans la liste et d'autre part, l'approche numérique permet de quantifier les risques de première et de seconde espèce.

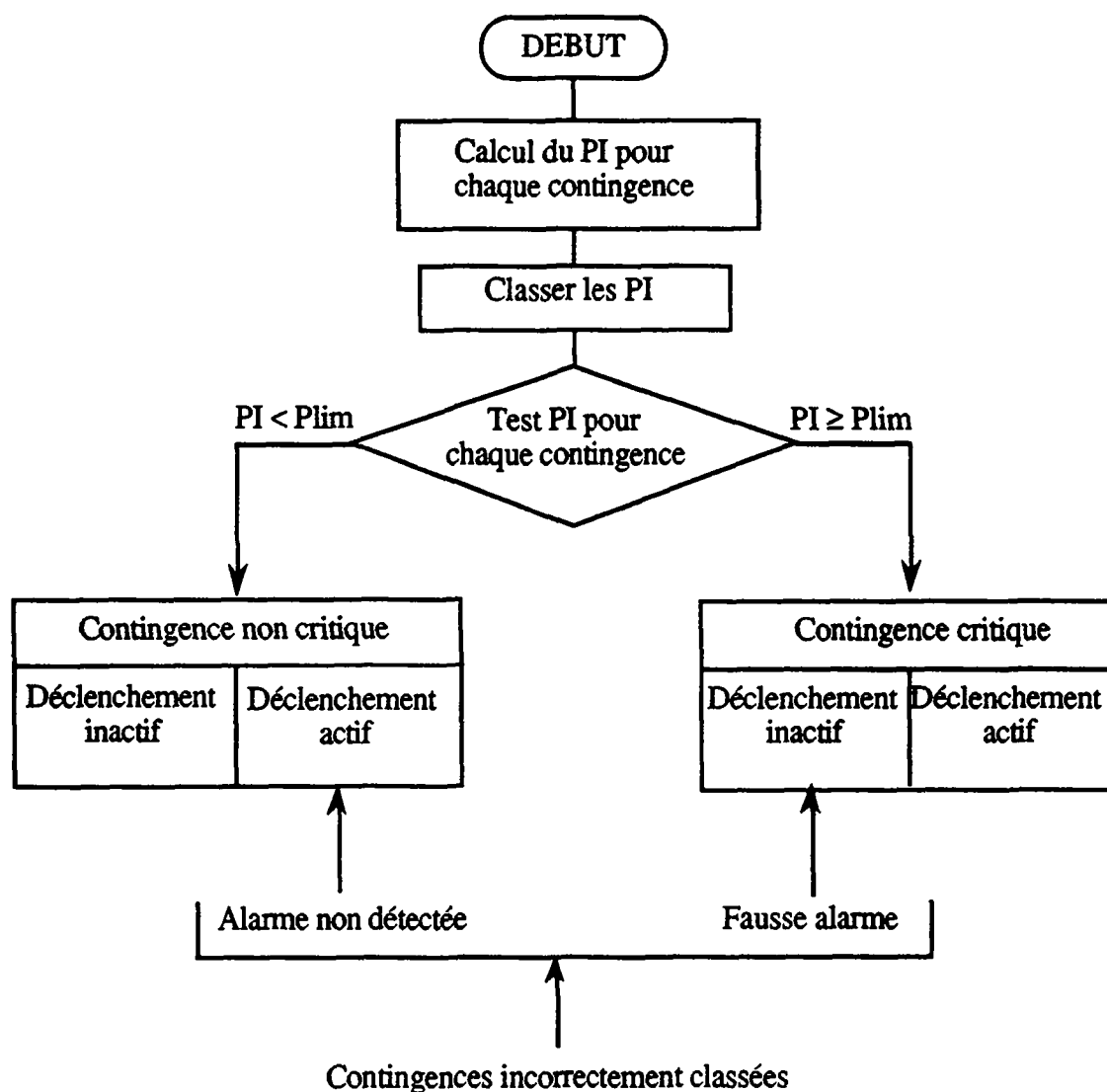


Figure 4.1: Algorithme général pour la validation d'une méthode de classement des contingences.

4.2.1. Evaluation de l'efficacité d'une méthode par voie graphique

Cette méthode consiste à reporter sur les abscisses le numéro du classement de la contingence selon l'ordre obtenu à l'aide d'un calcul complet de répartition de puissance pour le cas de charge considéré. La liste de référence obtenue est comparée avec la liste des contingences classées par

ordre décroissant de la valeur de l'indice de performance. Le numéro de classement de la contingence est reporté sur l'ordonnée du graphique.

Exemple: Pour la liste de référence, la contingence A est classée au deuxième rang. Pour la liste à valider, la contingence A est classée au cinquième rang. Le point (2,5) est alors reporté sur le graphique.

Plus le classement des contingences selon la méthode choisie est de qualité, plus les points obtenus doivent se trouver sur une droite de pente 1 (cf. figure 4.2). Plus les points s'écartent de cette droite, moins la qualité du classement est bonne.

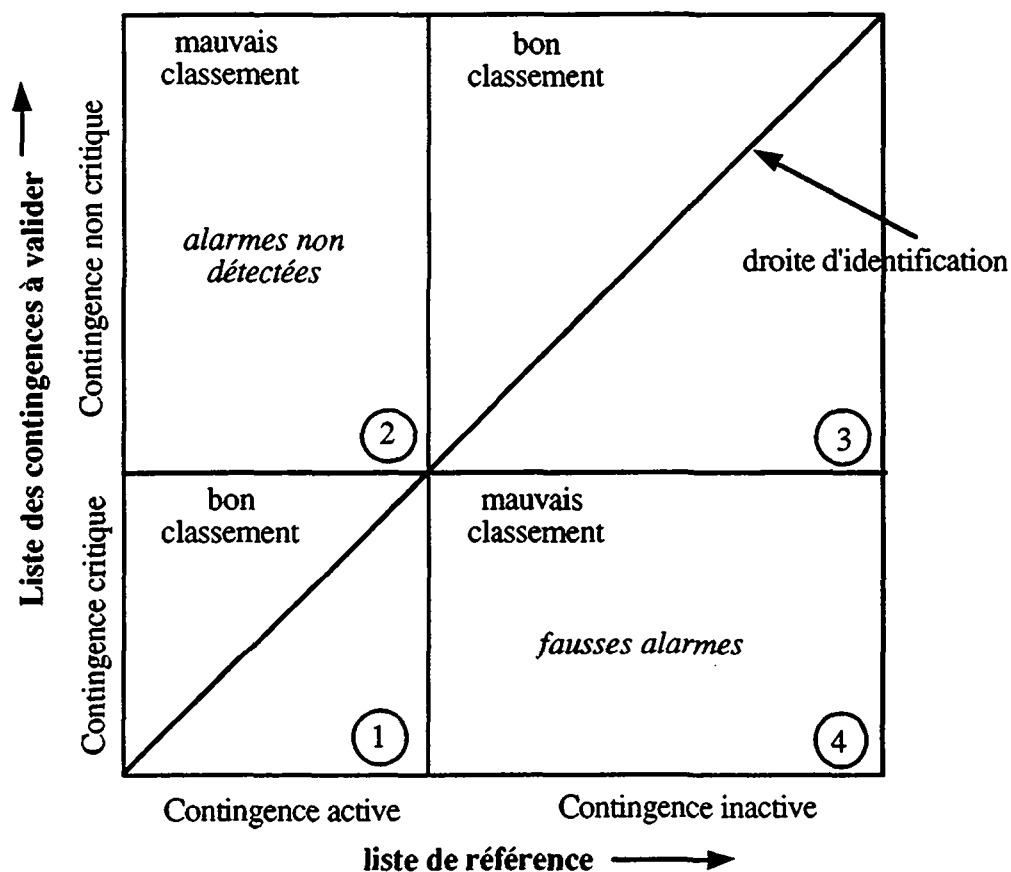


Figure 4.2: Classification des contingences par voie graphique pour un point de fonctionnement du réseau considéré

Il est possible de décomposer le graphe obtenu en quatre régions:

- La région 1 comprend les contingences déclarées par la méthode comme critiques et qui sont actives. Tous les points situés dans cette région correspondent à un diagnostic correct.
- La région 2 comprend les contingences déclarées par la méthode comme non critiques et qui sont en réalité actives. Tous les points situés dans cette région correspondent à un mauvais diagnostic pour la méthode présentée.

- La région 3 comprend les contingences déclarées par la méthode comme non critiques et qui sont inactives. Tous les points situés dans cette région correspondent à un diagnostic correct.
- La région 4 comprend les contingences déclarées par la méthode comme critiques et qui sont inactives. Tous les points situés dans cette région correspondent à de fausses alarmes.

La droite verticale qui constitue la limite entre les contingences actives et inactives ne peut être déplacée, car le nombre de contingences actives reste constant pour un point de fonctionnement du réseau considéré. Par contre, la droite qui constitue la limite entre les contingences critiques de celles qui ne le sont pas peut être déplacée, en variant la valeur de PI_{lim} . Le PI_{lim} correspond à la valeur de l'indice de performance limite au delà duquel une contingence est considérée comme critique. Il convient de noter que la valeur de l'indice de performance limite n'est pas semblable pour les contingences actives et critiques car le nombre d'itérations utilisé pour le calcul de répartition de puissance n'est pas le même. Un choix judicieux de la valeur PI_{lim} permet, d'une part, de maximiser le nombre de contingences se situant dans les régions 1 et 3 du graphe de la figure 4.2 et, d'autre part, de minimiser le nombre de contingences situées dans les régions 2 et 4.

4.2.2. Evaluation de l'efficacité d'une méthode par voie numérique

Les différentes mesures présentées ci-dessous pour l'évaluation par voie numérique des performances des méthodes de classement des contingences sont issues de [Lo88]. Trois principales mesures sont présentées :

- Précision de filtrage "*filtering accuracy*"
- Nombre de fausses alarmes
- Temps de calcul

4.2.2.1. Précision de filtrage "*filtering accuracy*"

Cette grandeur exprime l'efficacité de la méthode à discriminer les contingences actives de celles qui ne le sont pas. Le taux de précision de filtrage est défini de la manière suivante :

$$TPF = \frac{N_{cc}}{N_{cc,ref}} \quad (4.2)$$

- TPF** : Taux de précision de filtrage.
 $N_{cc,ref}$: Nombre de contingences actives.
 N_{cc} : Nombre de contingences critiques déterminées par la méthode.

Une valeur de $T_{PF} = 1$ indique que toutes les contingences actives sont détectées par la méthode.

4.2.2.2. Taux de fausses alarmes

Cette grandeur exprime l'efficacité de la méthode à éliminer les fausses alarmes, c'est-à-dire à minimiser le nombre de contingences critiques qui sont en réalité non actives. Elle est calculée de la manière suivante :

$$T_{FA} = \frac{N_{fa}}{N - N_{cc,ref} - N_{cc,elim}} \quad (4.3)$$

T_{FA} : Taux de fausses alarmes.

N_{fa} : Nombre de fausses alarmes détectées par la méthode.

N : Nombre de branches du réseau.

$N_{cc,ref}$: Nombre de contingences actives.

$N_{cc,elim}$: Nombre de contingences conduisant à un réseau non connexe ou pour lesquelles le calcul de répartition de puissance n'a pas convergé. Pour toutes ces contingences, l'état du réseau suite au déclenchement n'est pas connu.

Un taux de fausses alarmes $T_{FA} = 1$ indique que toutes les contingences non actives sont considérées comme critiques par la méthode utilisée.

4.2.2.3. Temps de calcul

Il peut être exprimé en valeur relative, comme le quotient entre le temps de calcul de la méthode de classement des contingences et le temps de calcul de la liste de référence obtenu à l'aide d'un calcul complet de répartition de puissance. Le temps de calcul indique l'efficacité de la méthode de classement. Le rapport R_t est déterminé de la manière suivante :

$$R_t = \frac{\text{Temps utilisé par la méthode de classement des contingences}}{\text{Temps utilisé par le calcul de répartition de puissance complet}} \quad (4.4)$$

4.3. Paramètres propres aux indices de performance

Ce point présente les indices de performance pris en considération et plus particulièrement l'influence des paramètres propres à chaque indice de performance. Le propos n'est pas d'effectuer une comparaison systématique des différentes méthodes de classement des contingences mais plutôt de s'inspirer de l'article de [Lo88] pour effectuer le choix d'un indice de performance et des valeurs des paramètres qui garantissent l'identification d'un nombre maximum de contingences actives tout en minimisant le nombre de fausses alarmes.

4.3.1. Facteurs à prendre en considération

Les trois principaux facteurs qui influencent la qualité des résultats obtenus avec les méthodes de classement des contingences par ordre de sévérité sont les suivants :

- Choix de l'indice de performance
- Choix des valeurs des coefficients utilisés pour l'expression de l'indice de performance
- Choix du nombre d'itérations pour calculer l'indice de performance

De par la nature heuristique des expressions utilisées pour le calcul de l'indice de performance, il est nécessaire de déterminer de manière expérimentale l'influence de chacun des facteurs. En appliquant l'algorithme de la figure 4.1, la précision de la méthode analysée est estimée en comparant les résultats avec ceux obtenus avec un calcul de répartition de puissance. Le propos de l'évaluation n'est pas de déterminer la qualité du critère d'arrêt. De manière à se soustraire de l'arbitraire constitué par l'introduction d'un critère d'arrêt (cf. section 1.2.2 [Eje79]), les performances de la méthode sont analysées en considérant la valeur optimale de l'indice de performance. Cette valeur optimale permet de maximaliser la valeur du taux de précision de filtrage et de minimiser le taux de fausses alarmes.

4.3.2. Les indices de performance

Ce paragraphe décrit les méthodes de calcul d'indices de performance qui considèrent uniquement les problèmes thermiques. Plusieurs méthodes sont présentées dans la littérature [Ver87],[Lo88]. Parmi celles-ci, les indices de performance considérés ont été choisis sur la base des résultats de la comparaison présentée dans l'article [Lo88]. Les indices sélectionnés ci-dessous nécessitent un temps de calcul qui se situe dans la moyenne des temps de calcul obtenus dans l'article de [Lo88].

Méthode 1

Elle consiste à calculer l'indice de performance pour chaque contingence à partir d'une seule itération d'un calcul complet de répartition de puissance. L'indice de performance (PI) est défini de la manière suivante :

$$PI_{n1/k} = \sum_{i=1}^l w_i \left[\left| \frac{P_i}{P_{i\max}} \right| \right]^{n1} \quad (4.5)$$

- P_i : Puissance active transitant dans la branche i .
- $P_{i\max}$: Puissance active maximale admissible dans la branche i .
- w_i : Facteur de poids associé à la branche i .
- i : Numéro de la branche.
- k : Numéro de la contingence.

- l : Nombre de branches.
n1 : Exposant entier.

Le deuxième et le troisième indice de performance pris en considération constituent tous deux une variation de l'indice de performance de la méthode 1.

Méthode 2

Elle consiste à calculer l'indice de performance selon le même principe que la méthode 1, à la différence qu'un poids plus important est attribué à la branche la plus chargée suite à la contingence. Ce poids peut être ajusté à volonté par le choix du coefficient réel n2.

$$PI_{n1/k} = \sum_{i=1}^l w_i \left[\left| \frac{P_i}{P_{imax}} \right| \right]^{n1} + |H_{a1}|^{n2} \quad (4.6)$$

- H_{a1} : Puissance active maximale calculée / Puissance active maximale admissible dans cette branche.
n1, n2 : Exposant entier.

Méthode 3

La méthode 1 considère toutes les branches du réseau, mais elle peut conduire tout comme la méthode 2 à un mauvais classement des contingences. En effet, une contingence qui conduit le réseau à avoir plusieurs branches fortement chargées peut être considérée comme plus critique qu'une contingence qui provoque par exemple une seule surcharge. C'est l'effet de masquage connu sous le nom de "masking effect" dans la littérature. L'idée de la méthode 3 consiste à considérer, pour le calcul de l'indice de performance, uniquement les branches surchargées. La forme de l'indice de performance est semblable à celle de la méthode 1 avec le coefficient w_i choisi de la manière suivante [Lo88] :

$$w_i = \left\{ \alpha_i \quad \text{SI } |P_i| > P_{imax} \quad \text{et} \quad 0 \quad \text{SI } |P_i| \leq P_{imax} \right\} \quad (4.7)$$

- α_i : Un nombre réel différent de zéro ($\alpha_i = 1$ normalement).
 P_i : Puissance active transitant dans la branche i.
 P_{imax} : Puissance active maximale admissible dans la branche i.

4.3.3. Sélection des paramètres de l'indice de performance

Ce point présente successivement les facteurs suivants :

- Choix de la méthode de calcul de l'indice de performance.
- Choix du coefficient n_1 .
- Choix du nombre d'itérations.

Dans le cadre de cette étude, le facteur de poids w_i associé à chaque branche i a été choisi égal à l'unité pour les méthodes 1 et 2. Il est bien entendu possible d'associer un poids différent pour chaque branche et suivre, par exemple, l'approche présentée par les auteurs de l'article [Hsu92] (cf. 1.2.2).

4.3.3.1. Choix de la méthode de calcul de l'indice de performance

De manière à estimer leurs qualités, les trois méthodes proposées précédemment ont été appliquées en utilisant la situation hiver heure pleine qui comprend 33 contingences critiques (cf. section 6.3.5.1). Les résultats obtenus, en calculant une seule itération du calcul de répartition de puissance avec $n_1 = 10$ et $n_2 = 4$, sont contenus dans le tableau ci-dessous. Le tableau 4.1 contient les valeurs extrêmes des taux de précision de filtrage et de fausses alarmes pour chacune des méthodes, c'est-à-dire le cas où le nombre de fausses alarmes est nul et le cas où le nombre de contingences correctement détectées est maximum. Pour chacun de ces deux cas, les valeurs obtenues sont indiquées. D'autre part, les figures 4.3 et 4.4 présentent pour chacune des méthodes la représentation graphique des résultats obtenus selon la méthode décrite au point 4.2.1.

Tableau 4.1: Comparaison des résultats obtenus pour les différentes méthodes

	Méthode 1	Méthode 1	Méthode 2	Méthode 2	Méthode 3	Méthode 3
Nombre de fausses alarmes	0	57	0	57	0	195
Nombre de contingences détectées	25	33	25	33	24	33
T_{FA} [%]	0	29.8	0	29.8	0	99.35
T_{PF} [%]	75.75	100	75.75	100	68.96	100

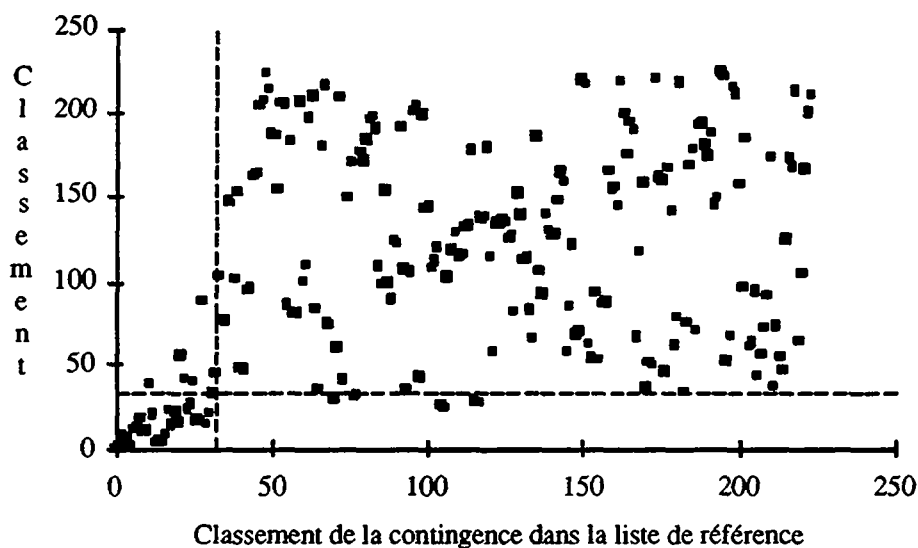


Figure 4.3: Représentation graphique du classement des contingences à l'aide de la méthode 1 pour la situation heure pleine.

La représentation graphique du classement des contingences à l'aide de la méthode 2 pour la situation hiver heure pleine est semblable à celle obtenue avec la méthode 1.

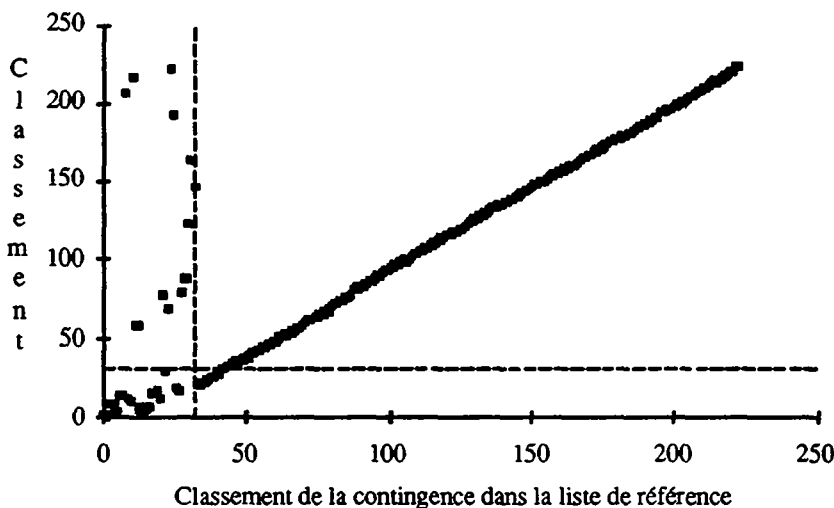


Figure 4.4: Représentation graphique du classement des contingences à l'aide de la méthode 3 pour la situation hiver heure pleine

Commentaires

Pour la situation hiver heure pleine, c'est la méthode 1 qui permet d'obtenir les meilleurs résultats. Elle permet de minimiser le nombre de contingences qui se trouvent dans les quadrants 2 et 4 du graphique. La méthode 2 ne permet pas d'améliorer de manière significative les résultats et la méthode 3 ne permet pas d'obtenir des résultats d'aussi bonne qualité.

4.3.3.2. Choix du coefficient n1

Sur la base des résultats précédents, il apparaît nécessaire d'étudier l'influence du choix du paramètre n1 en prenant en considération la méthode 1. La qualité des résultats obtenus dépend fortement de la mise en oeuvre numérique du calcul de l'indice de performance. Il est nécessaire de prendre en considération le conditionnement des nombres par l'ordinateur. Deux situations peuvent se présenter lors du calcul de la contribution de la branche i au calcul de l'indice de performance pour le déclenchement de la branche k :

Situation A : $|P_i| > P_{imax}$ et Situation B : $|P_i| \leq P_{imax}$

Lors du calcul de l'indice de performance suite à un déclenchement, il est important de prendre en considération l'effet de l'élévation à une puissance entière du rapport $|P_i| / P_{imax}$. Dans le cas de la situation A, lorsque n1 augmente, $|P_i| / P_{imax}$ tend vers l'infini. Par contre, dans la situation B, ce même rapport tend vers zéro. De manière à s'assurer une évolution des indices de performance dans la même direction lorsque n1 croît, il est nécessaire de normaliser le rapport $|P_i| / P_{imax}$. La normalisation peut être effectuée, par exemple, en multipliant P_{imax} par un nombre entier constant (cste) de telle manière que :

$$0 \leq \frac{P_i}{cste * P_{imax}} \leq 1$$

La valeur constante (cste) doit être supérieure à la plus grande surcharge en p.u. obtenue lors de l'analyse systématique des contingences simples.

Il faut être conscient qu'il n'est pas possible de faire tendre la valeur de n1 vers l'infini car le résultat de l'élévation du rapport $|P_i| / P_{imax}$ va tendre rapidement vers zéro. La dispersion des valeurs de l'indice de performance ne sera plus suffisante pour permettre une séparation entre les contingences critiques et celles qui ne le sont pas. Un faible écart autour de la valeur de l'indice de performance limite optimal aura pour conséquence de dégrader considérablement la qualité des résultats obtenus.

La figure 4.5 présente une comparaison du taux de fausses alarmes (ou plus précisément $1 - T_{FA}$) en fonction de la précision de filtrage pour différentes valeurs de n1. De manière générale, plus la valeur de n1 augmente, plus les résultats tendent vers une situation où le taux de fausses alarmes est nul pour une précision de filtrage égale à 100%¹. Par contre, en dessus d'une valeur limite de n1 égale à 11 pour la situation hiver heure pleine, l'augmentation de la valeur de n1 diminue la qualité des résultats. En effet, le rapport $|P_i| / P_{imax}$ se rapproche de zéro et les valeurs des indices de performance ne sont plus suffisamment dispersées, autour de la valeur de l'indice de performance limite, pour permettre d'identifier un seuil et séparer les contingences critiques de celles qui ne le sont pas. Les résultats présentés à la figure 4.5 ont été obtenus sur la base d'une seule itération d'un calcul de répartition de puissance.

¹ cf. le point de coordonnées (1,1) sur la figure 4.5.

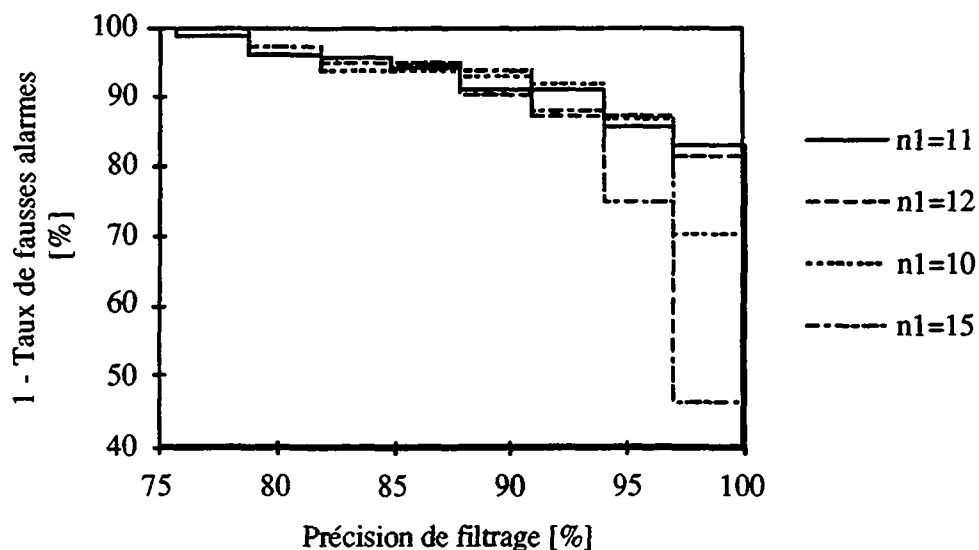


Figure 4.5: Comparaison du couple 1- taux de fausses alarmes et précision de filtrage pour différentes valeurs de $n1$ dans le cas de la situation hiver heure pleine pour une seule itération.

4.3.3.3. Choix du nombre d'itérations

Il convient également de prendre en considération le temps nécessaire pour le calcul des indices de performance en fonction du nombre d'itérations utilisé pour le calcul de répartition de puissance. Les résultats obtenus pour le cas de charge hiver heure pleine sont représentés à la figure 4.6 pour la méthode 1. L'analyse des résultats obtenus indique que le calcul de l'indice de performance à l'aide d'une itération d'un calcul de répartition de puissance nécessite environ 25% du temps nécessaire pour une analyse de toutes les contingences à l'aide d'un calcul complet de répartition de puissance. Le calcul de répartition de puissance nécessite au minimum 12 itérations et au maximum 78 itérations pour assurer un critère de convergence de 0.1 pu pour les puissances. Le nombre moyen d'itérations nécessaires pour assurer la convergence est de 20.

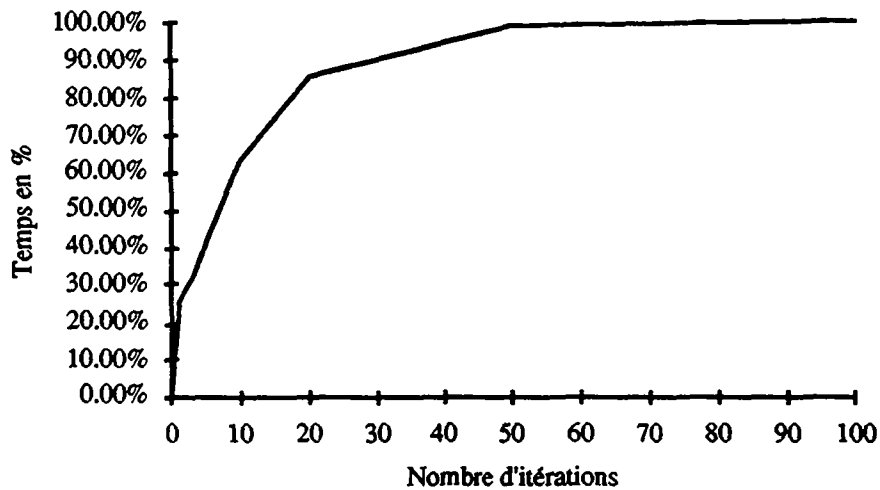


Figure 4.6: Comparaison du temps de calcul des indices de performance en fonction du nombre d'itérations pour la situation hiver heure pleine ²

Tous les résultats présentés jusqu'à maintenant ont été obtenus sur la base d'une seule itération d'un calcul de répartition de puissance. La figure 4.6 indique qu'il est possible d'utiliser un nombre d'itérations plus élevé sans que le temps de calcul n'augmente considérablement, par exemple lorsque le nombre d'itérations est égal à 5. La figure 4.7 présente les résultats obtenus pour différentes valeurs du nombre d'itérations avec $n_1=12$.

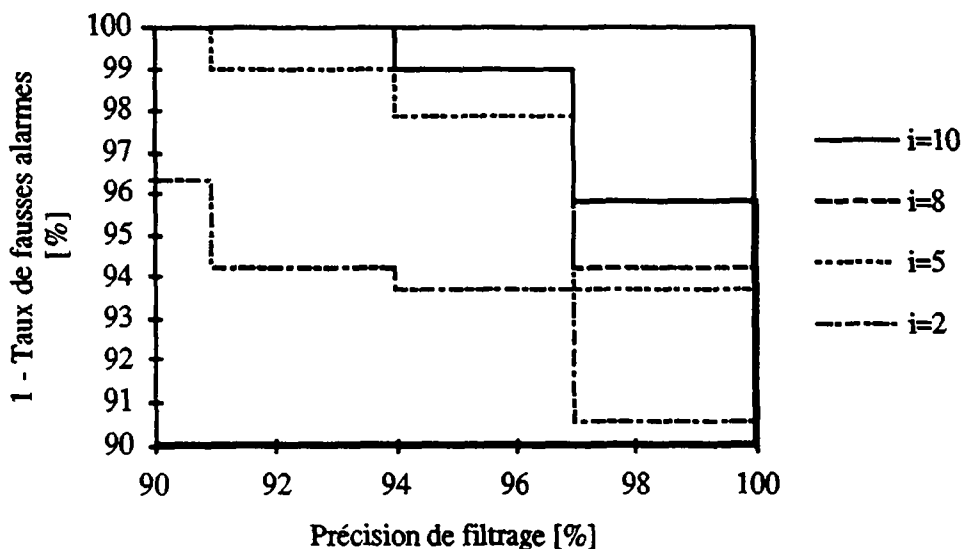


Figure 4.7: Comparaison du couple 1- taux de fausses alarmes et précision de filtrage pour la situation de charge hiver heure pleine avec $n_1 = 12$ en faisant varier le nombre d'itérations utilisé pour le calcul de l'indice de performance

² Les calculs ont été effectués sur une station de travail HP-Apollo 425t.

La figure 4.8 représente le couple 1-taux de fausses alarmes et le taux de précision de filtrage pour différentes valeurs de $n1$ en choisissant un nombre d'itérations égal à 5 pour le calcul de répartition de puissance. En comparant les résultats obtenus avec ceux de la figure 4.7, il apparaît clairement qu'il est possible de choisir un nombre $n1$ plus élevé tout en assurant une qualité de résultats plus élevée. Le tableau 4.2 résume les résultats obtenus en choisissant la méthode 1 pour le calcul de l'indice de performance dans le cas de charge considéré. Les deux cas présentés correspondent respectivement à la situation où le taux de précision de filtrage est maximum et la situation où le taux de fausses alarmes est nul.

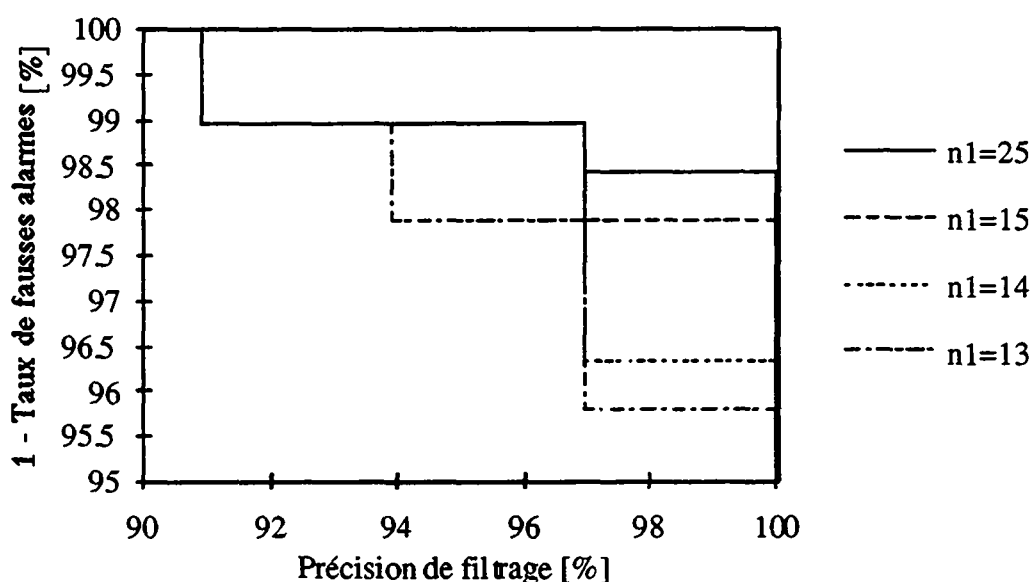


Figure 4.8: Comparaison du couple 1- taux de fausses alarmes et précision de filtrage pour différentes valeurs de $n1$ en considérant la situation hiver heure pleine avec un nombre d'itérations égal à 5

Tableau 4.2: Résultats obtenus pour la méthode 1 avec $n1 = 25$ et un nombre d'itérations égal à 5 dans le cas de la situation de charge hiver heure pleine

	Méthode 1	Méthode 1
Nombre de fausses alarmes	3	0
Nombre de contingences détectées	33	29
T_{FA} [%]	1.57	0
T_{PF} [%]	100	87.88

4.3.4. Conclusion

En analysant les différentes caractéristiques observées pour les trois méthodes analysées, la qualité des résultats obtenus dépend fortement des paramètres choisis. De manière à limiter le choix de la valeur des paramètres, tout en considérant les résultats obtenus en période de forte charge, c'est la méthode 1 qui va être utilisée pour la mise en oeuvre d'une méthode de

classement des contingences dans le contexte d'un système expert. Les résultats obtenus avec un nombre d'itérations égal à 5, en utilisant l'indice de performance de la méthode 1, permettent d'obtenir des résultats de qualité sans augmenter considérablement le temps de calcul pour l'indice de performance. Cependant, il n'est pas possible d'obtenir à l'aide des méthodes étudiées un classement des contingences qui permette de déterminer toutes les contingences critiques sans aucune fausse alarme.

4.4. Méthode de classement des contingences et système expert.

En intégrant une méthode de classement des contingences dans un système expert, il convient de considérer la possibilité de vérifier le diagnostic ou de confronter le diagnostic avec d'autres sources de connaissance. De manière générale, le fonctionnement du système expert proposé permet de faire appel à différentes formes de connaissance (cf. 2.5.2.). Le moteur d'inférence ne doit pas systématiquement faire appel au calcul de l'indice de performance pour l'analyse de chacune des contingences.

Les informations obtenues avec le classement des contingences par ordre de sévérité ne doivent pas être considérées de manière isolée mais doivent pouvoir être exploitées par le moteur d'inférence. De manière générale, le classement des contingences nécessite un temps de calcul qui n'est pas négligeable (cf. figure 4.6) et ne permet pas toujours de déterminer toutes les contingences critiques. Il faut parfois avoir recours au calcul de répartition de puissance pour un nombre de fausses alarmes plus ou moins grand selon le point de fonctionnement du réseau. En considérant la capacité du moteur d'inférence à exploiter une connaissance multiple, la méthode proposée ci-dessous consiste à estimer la valeur de l'indice de performance limite sur la base de l'information obtenue pour des points de fonctionnement au voisinage du point considéré. L'idée consiste à calculer un classement des contingences lorsque le temps nécessaire est à disposition ou lorsque le point de fonctionnement du réseau s'éloigne de manière importante de celui utilisé pour estimer la valeur limite de l'indice de performance. Le système expert doit prendre en considération l'estimation de la valeur de l'indice de performance limite pour son diagnostic, tout en tenant compte de l'évolution de l'état de charge du réseau. La méthode choisie, pour estimer la valeur de l'indice de performance limite, est récursive et basée sur les moindres carrés.

4.4.1. Méthode des moindres carrés

La méthode des moindres carrés utilisée pour estimer l'indice de performance limite n'est pas nouvelle; elle a été proposée par Karl Gauss en 1795 pour estimer le déplacement des planètes en utilisant des mesures télescopiques. Deux approches peuvent être utilisées pour le traitement de mesures par les moindres carrés. La première traite simultanément toutes les mesures. La seconde propose de traiter les mesures de manière récursive par groupe, éventuellement une à une.

Le point de départ de la méthode des moindres carrés est basé sur le modèle linéarisé suivant :

$$Z(k) = H(k) \cdot \theta + V(k) \quad (4.8)$$

Le modèle estimé pour $Z(k)$ est le suivant :

$$\hat{Z}(k) = H(k) \cdot \hat{\theta}(k) \quad (4.9)$$

- N : Nombre de mesures.
- n : Nombre de paramètres à estimer.
- k : Numéro de la mesure.
- Z (N) : Vecteur de mesures.
- H(Nxn) : Matrice d'observation.
- θ (n) : Vecteur des n paramètres à estimer.
- V (N) : Vecteur du bruit attaché à chaque mesure.

De manière à obtenir une estimation des n paramètres, il est nécessaire de disposer d'un nombre de mesures N supérieur ou égal au nombre de paramètres n. Si $N > n$, alors le nombre de mesures est supérieur au nombre d'inconnus; le système d'équations est alors surdéterminé. Les mesures supplémentaires à disposition (N-n) peuvent être utilisées pour filtrer les données, c'est-à-dire atténuer l'effet du vecteur bruit sur l'estimation des paramètres.

4.4.2. Estimateur des moindres carrés

La fonction utilisée pour obtenir $\hat{\theta}(k)$ est basée sur la minimisation de la fonction objectif suivante :

$$J[\hat{\theta}(k)] = \tilde{Z}^T(k) \cdot W(k) \cdot \tilde{Z}(k) \quad \text{où} \quad \tilde{Z}(k) = Z(k) - \hat{Z}(k) \quad (4.10)$$

L'objectif de la méthode consiste à diminuer la différence entre la valeur exacte des paramètres et la valeur estimée. Dans le cas idéal où il n'y a pas de bruit de mesure, les valeurs exactes et estimées correspondent. La matrice $W(N \times N)$ est appelée matrice des poids. Elle est définie positive et symétrique. Il n'y a pas de règle générale pour le choix du poids associé à chaque mesure. Le choix conventionnel consiste à utiliser une matrice diagonale. Lorsque le poids attribué à une nouvelle mesure est supérieur à 1, la mesure courante est considérée comme plus importante que les précédentes mesures. Un tel choix pour l'attribution d'un poids associé à la matrice W un facteur d'âge ou d'atténuation aux anciennes mesures. Au contraire, lorsque le poids associé à une nouvelle mesure est inférieur à 1, alors la nouvelle mesure est considérée avec moins d'importance que les précédentes. Si le poids associé à chaque mesure est égal à 1, alors la matrice W est identique à la matrice identité.

L'objectif des moindres carrés est de minimiser la fonction $J[\hat{\theta}(k)]$ de manière à obtenir une estimation de $\hat{\theta}(k)$. Le développement proposé par Mendel [Men87] se trouve dans l'annexe A. Le résultat obtenu est le suivant :

$$\hat{\theta}(k) = [H^t(k) \cdot W(k) \cdot H(k)]^{-1} \cdot H^t(k) \cdot W(k) \cdot Z(k) \quad (4.11)$$

4.4.3. Moindres carrés récursifs

L'expression des moindres carrés utilisée pour fournir une estimation de $\hat{\theta}(k)$ permet de prendre en compte un nombre de mesures N supérieur au nombre de paramètres n . En décidant de prendre en considération d'autres mesures, c'est-à-dire en augmentant leur nombre de N à N' , la formule des moindres carrés proposée ne permet pas d'utiliser la valeur de $\hat{\theta}$ préalablement calculée avec les N premières mesures pour la nouvelle expression de $\hat{\theta}$ basée sur les N' mesures. Il est à nouveau nécessaire de calculer l'inverse de la matrice $H^t(k) \cdot W(k) \cdot H(k)$. De manière intuitive, il doit être possible de calculer une estimation de $\hat{\theta}$ pour les N' mesures en modifiant la précédente estimation pour les $N'-N$ nouvelles mesures.

En considérant l'apport d'une nouvelle mesure au temps $k+1$, le système linéaire initial peut se mettre sous la forme suivante :

$$\begin{bmatrix} z(k+1) \\ Z(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h^t(k+1) \\ H(k) \end{bmatrix} \cdot \theta + \begin{bmatrix} v(k+1) \\ v(k) \end{bmatrix}$$

Mendel propose dans son ouvrage [Men87] la formule des moindres carrés récursifs suivante pour $\hat{\theta}(k+1)$

$$\hat{\theta}(k+1) = \hat{\theta}(k) + k_w(k+1) \cdot [z(k+1) - h^t(k+1) \cdot \hat{\theta}(k)] \quad (4.12)$$

$$k_w(k+1) = P(k) \cdot h(k+1) [h^t(k+1) \cdot P(k) \cdot h(k+1) + \frac{1}{w(k+1)}]^{-1} \quad (4.13)$$

$$P(k+1) = [I - k_w(k+1) \cdot h^t(k+1)] \cdot P(k) \quad (4.14)$$

Le processus itératif est capable de démarrer lorsque le nombre de mesures N est égal au nombre des paramètres n à estimer. La valeur initiale de P est donnée par l'expression suivante :

$$P(n) = [H^t(n) \cdot W(n) \cdot H(n)]^{-1} \quad (4.15)$$

Le schéma bloc des opérations à effectuer est présenté à la figure 4.9.

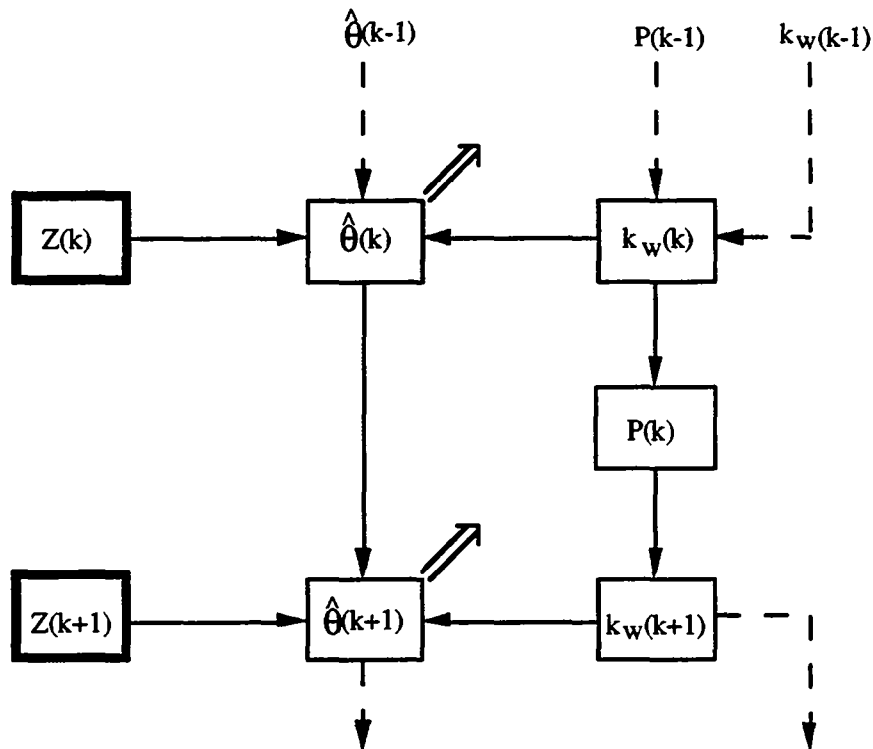


Figure 4.9: Schéma bloc des opérations à effectuer pour estimer $\hat{\theta}(k+1)$

4.4.4. Mise en oeuvre des moindres carrés récursifs

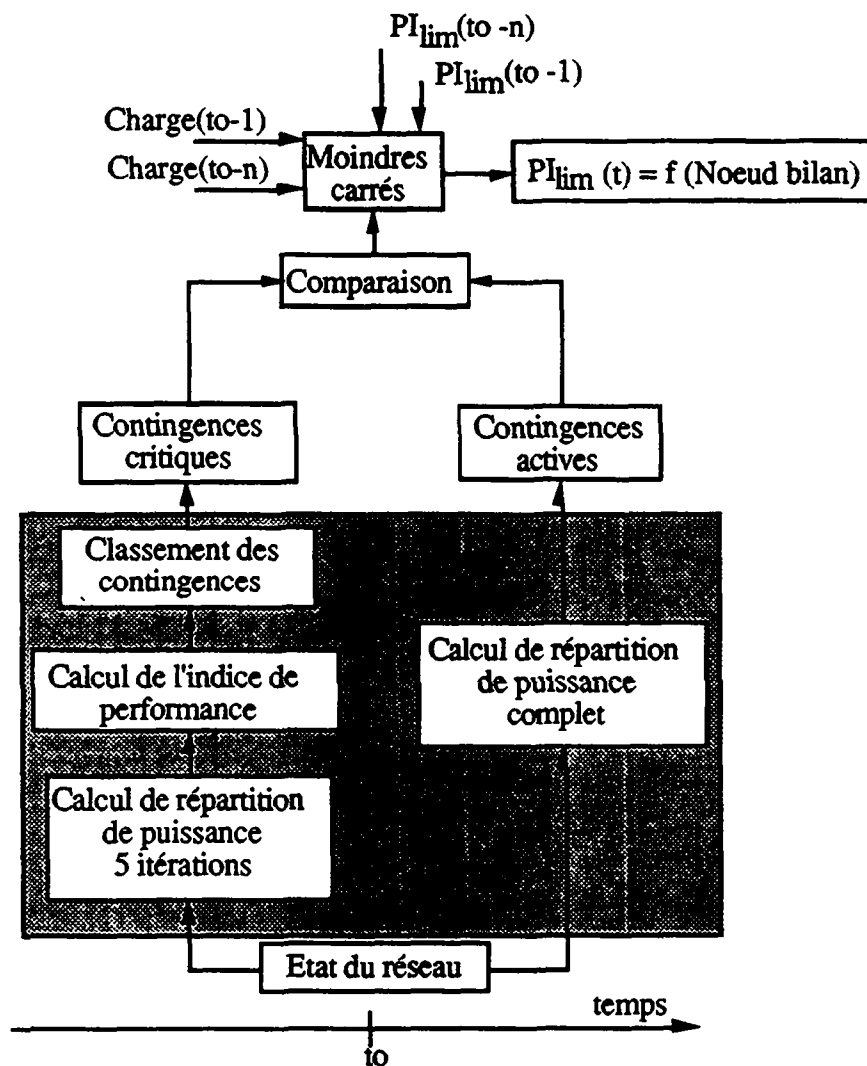
La mise en oeuvre d'une estimation de l'indice de performance limite nécessite le choix de deux grandeurs: d'une part le choix de l'ordre du système et d'autre part, le choix de la grandeur du système à observer.

La grandeur du système à observer doit constituer un attribut représentatif de l'état de fonctionnement du réseau électrique considéré. De manière générale, les grandeurs connues d'un réseau électrique sont les productions et les consommations aux noeuds. En considérant les différentes caractéristiques des noeuds, le noeud bilan a été choisi comme grandeur observée. En examinant l'indice de performance limite obtenu pour différents cas de charge voisins d'un point de fonctionnement, la variation de cette grandeur peut être linéarisée.

Pour la mise en oeuvre des moindres carrés, l'observation du noeud bilan a été choisie. La relation $PI_{lim} = f(\text{Production au noeud bilan})$ est considérée comme linéaire autour du point de fonctionnement initial du réseau. D'autres relations peuvent être envisagées; par exemple, une combinaison des échanges de puissance aux noeuds frontières du réseau considéré.

L'utilisation des moindres carrés peut être envisagée d'une part en mode d'apprentissage et d'autre part en mode d'estimation. L'utilisation en mode d'apprentissage intervient lorsqu'un indice de performance limite a été calculé suite à un classement des contingences pour un point de fonctionnement. La figure 4.10 illustre ce fonctionnement. Au temps t_0 , un calcul de répartition de puissance est effectué pour l'ensemble des contingences simples envisageables.

Une liste de référence est ainsi constituée. Cette liste permet de séparer les contingences actives de celles qui ne le sont pas. En parallèle, l'indice de performance est calculé avec un nombre réduit d'itérations du calcul de répartition de puissance (par exemple cinq itérations). Les contingences sont classées par ordre de sévérité, c'est-à-dire dans l'ordre décroissant des indices de performance. Une comparaison entre les contingences actives et le classement des contingences par ordre de sévérité permet de déterminer une valeur de l'indice de performance limite au delà duquel la contingence est considérée comme critique. La valeur PI_{lim} obtenue de cette manière est introduite comme une mesure supplémentaire dans l'estimateur récursif des moindres carrés de manière à corriger l'estimation précédemment obtenue.



▨ : Tâches à effectuer pour chaque contingence simple

Figure 4.10: Principe de fonctionnement en mode d'apprentissage

La figure 4.11 illustre l'utilisation des résultats des moindres carrés pour l'estimation de l'indice de performance limite. En mode d'estimation, l'indice de performance correspondant au point de fonctionnement courant du réseau est obtenu en utilisant les paramètres estimés à partir des mesures effectuées pour d'autres points de fonctionnement voisins. L'estimation nécessite

également la connaissance du solde produit au noeud bilan à l'instant t_1 . La valeur de l'indice de performance calculée pour la contingence à évaluer est comparée à la valeur de l'indice de performance limite ainsi obtenue. Si La valeur du PI est supérieure au PI_{lim} , alors la contingence est considérée comme critique. Dans le cas contraire, la contingence est considérée comme non critique.

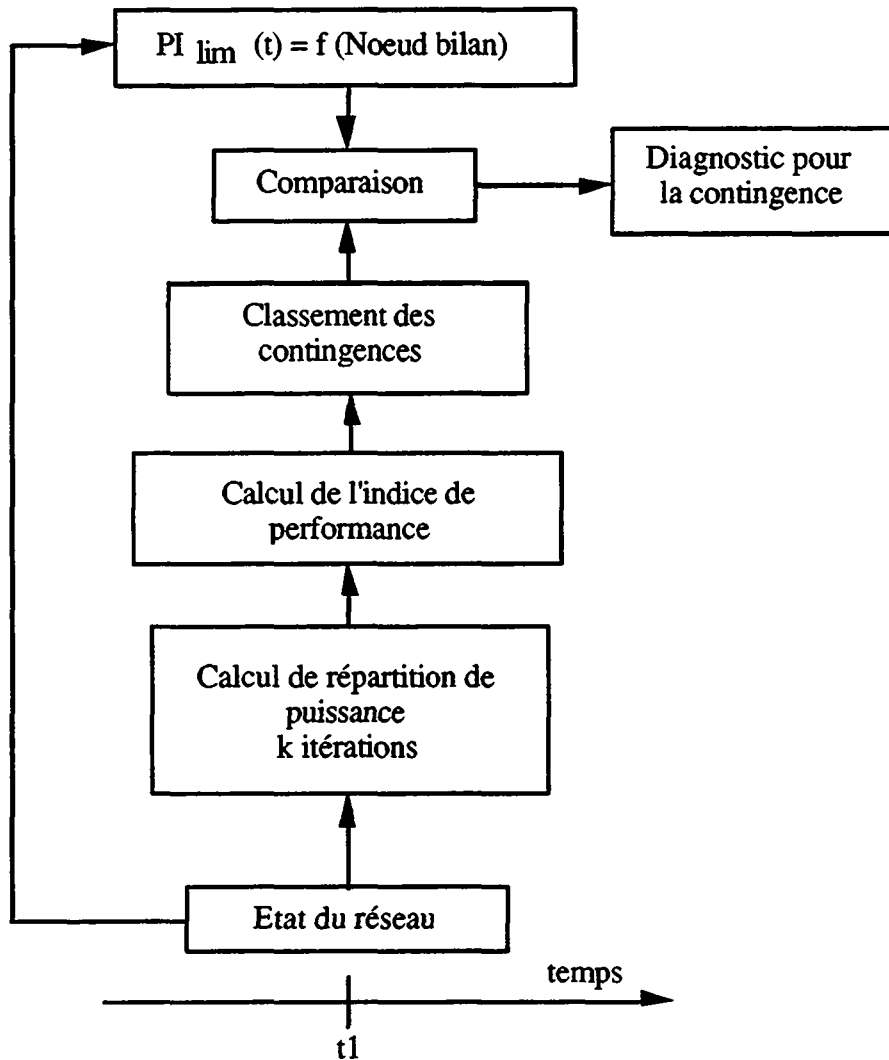


Figure 4.11: Principe de fonctionnement en mode d'estimation

4.4.5. Application des moindres carrés récursifs

La méthode proposée est appliquée au cas de charge hiver heure pleine. L'indice de performance limite a été calculé pour différents points de fonctionnement du réseau. Le graphique de la figure 4.12 indique les valeurs mesurées de l'indice de performance pour assurer la détermination de toutes les contingences actives. Il indique également l'estimation de l'indice de performance à partir des différentes mesures effectuées pour chacun des points de fonctionnement du réseau. Les variations de charge sont comprises entre -3% et +3%. Pour chacun de ces points de fonctionnement, le solde producteur du noeud bilan est indiqué. L'axe des ordonnées à droite correspond à la valeur de l'indice de performance.

D'autre part, le graphique de la figure 4.12 indique la précision de filtrage et le taux de fausses alarmes. Ces taux sont associés respectivement à l'indice de performance limite mesuré pour les contingences actives et à l'indice de performance limite obtenu à l'aide de l'estimation des moindres carrés. L'axe des ordonnées à gauche correspond à la légende des taux de précision de filtrage et de fausses alarmes.

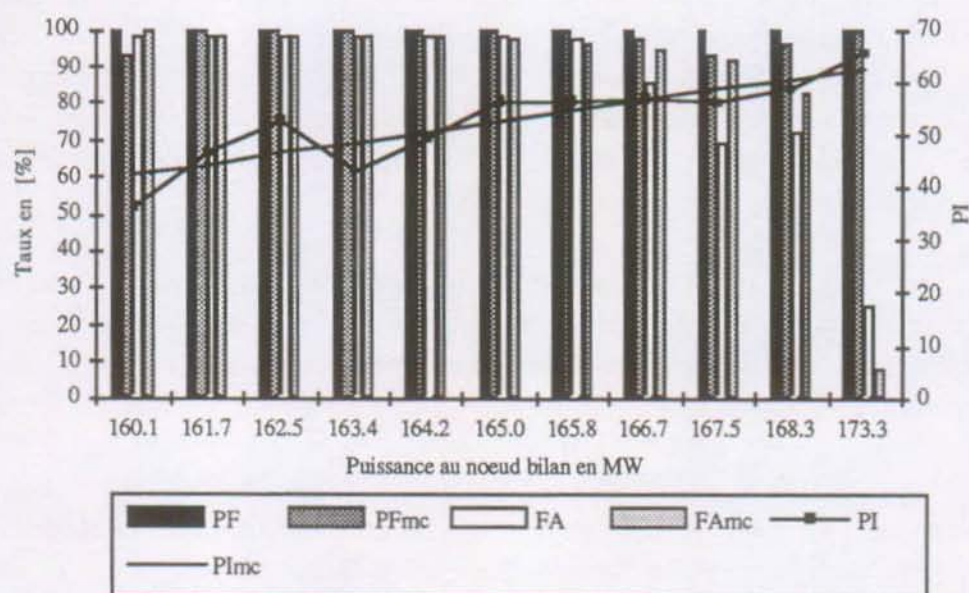


Figure 4.12: Indice de performance limite, taux de précision de filtrage et taux de fausses alarmes pour différents points de fonctionnement

Les valeurs de l'indice de performance limite mesurées pour les différents cas de charge sont approximées à l'aide d'une relation linéaire de la variation du solde producteur au noeud bilan. L'estimation de l'indice de performance proposée par les moindres carrés confirme cette hypothèse. Les précisions de filtrage obtenues pour les deux approches sont semblables. Les différences observées pour les taux de fausse alarme au voisinage d'une variation de 3% de charge s'expliquent en considérant le nombre de fausses alarmes. En effet, le nombre de contingences non actives est très faible car la situation du réseau est très fortement chargée. Par conséquent, toute contingence simple conduit à un point de fonctionnement où il existe au moins une branche qui se trouve proche de la limite thermique admissible.

4.4.6. Conclusion

De manière à apprécier les performances de la méthode proposée, il convient de préciser le contexte dans lequel elle est destinée à être utilisée. L'objectif de la méthode des moindres carrés est de déterminer la valeur de l'indice de performance limite qui permet de minimiser le taux de fausses alarmes et maximaliser le taux de précision de filtrage. De manière générale, l'efficacité de l'indice de performance dépend fortement du choix des paramètres. Lorsque la valeur de l'indice de l'exposant (n_1) augmente, les valeurs calculées de l'indice de performance ont tendance à se concentrer autour de la valeur de l'indice de performance limite. Par conséquent

une faible erreur sur la valeur estimée de l'indice de performance limite a pour conséquence de dégrader considérablement la qualité des résultats.

D'autre part, le choix de la grandeur observée peut être également discuté. Le choix du noeud bilan peut être remis en cause au profit, par exemple, d'une combinaison de noeuds. La grandeur observée peut également être une fonction du point de fonctionnement du réseau électrique. La méthode proposée vise essentiellement à corriger la valeur de l'indice de performance limite pour tenir compte de variations locales autour du point de fonctionnement. Il n'est à priori pas possible d'utiliser cette approche pour déterminer la valeur de l'indice de performance limite pour un point de fonctionnement très différent, car la valeur de la grandeur observée peut correspondre à des états de fonctionnement très différents.

La qualité des résultats obtenus à l'aide d'une méthode basée sur les moindres carrés indique l'intérêt de l'approche proposée pour estimer la valeur de l'indice de performance limite. Cette approche est intéressante lorsque le point de fonctionnement courant du réseau ne s'éloigne pas trop du point initial de fonctionnement auquel se réfèrent les mesures utilisées par l'estimateur des moindres carrés.

Il faut cependant être conscient que le temps de calcul nécessaire pour établir un classement des contingences n'est pas négligeable (environ 30 % du temps nécessaire pour un calcul complet). De plus, cette approche ne permet pas d'émettre un diagnostic correct pour toutes les contingences, d'où l'intérêt de son utilisation dans le contexte d'un système expert. En effet, le moteur d'inférence du système expert a la capacité de mettre en concurrence le diagnostic obtenu à partir de diverses sources de connaissance. Finalement, le système expert peut proposer un diagnostic final avec un certain seuil de confiance en se référant aux différents diagnostics à disposition.

Chapitre 5

Acquisition de connaissances qualitatives auprès des experts

Développer un système expert ne consiste pas seulement à choisir un outil de développement et obtenir un certain nombre de faits et de règles à transformer en utilisant la syntaxe de l'outil de développement. Dans le cas de l'analyse de sécurité en régime permanent, les faits, les règles n'étaient initialement pas connus et l'identification de la connaissance constitue l'effort de développement principal du système expert.

Le processus d'acquisition de connaissance vise à identifier, formuler et traiter la connaissance nécessaire à la résolution du problème par le système expert. Le processus en lui-même peut être abordé de différentes façons :

- L'ingénieur chargé de récolter et d'organiser la connaissance peut être son propre expert.
- La connaissance peut être acquise auprès de un ou plusieurs experts.

De manière générale, la tâche est rendue difficile car les experts ont de la peine à prendre suffisamment de recul pour analyser leurs pensées et leurs modes de raisonnement. Les mécanismes de réflexion des experts sont le plus souvent dirigés par une reconnaissance de situations qui se base sur le regroupement de facteurs ou de caractéristiques. Ces caractéristiques proviennent de l'expérience acquise au cours des années. La connaissance est généralement contenue dans un répertoire de situations liées entre elles par des liens subconscients. Ces situations mémorisées permettent de réagir rapidement à une situation, mais elles ne permettent pas d'expliquer de manière détaillée et succincte les étapes qui ont amené l'expert à émettre un diagnostic. En résumé, les experts ressentent de la difficulté à expliquer les actions de leur raisonnement, car ils ne sont souvent pas conscients de la structure de leur connaissance.

Ce chapitre traite de la connaissance acquise auprès des exploitants des réseaux de transport. Il présente les principaux facteurs considérés par les experts pour déterminer les contingences critiques de manière qualitative pour un état de fonctionnement du réseau électrique. Une approche basée sur l'utilisation de la logique floue est proposée pour traiter les règles correspondant à la contingence analysée. Finalement, un exemple illustre l'utilisation de la logique floue pour la vérification de compatibilité d'une règle avec les conditions courantes d'exploitation du réseau.

5.1. Approches utilisées pour l'acquisition de connaissances

L'approche courante pour l'acquisition de connaissances consiste à effectuer une série d'interviews entre un expert et l'ingénieur chargé de constituer la base de connaissances. Le principe général de l'acquisition de connaissances est de créer une interaction entre l'expert et l'ingénieur pour la résolution d'une situation. De manière générale, il est difficile pour l'expert de formaliser sa connaissance sans placer un problème dans son contexte. L'interaction entre l'expert et l'ingénieur de connaissance prend généralement l'une des trois formes suivantes :

- Description
- Observation
- Analyse

Description

L'expert présente une description structurée du domaine de résolution des problèmes. Cette forme d'interaction est généralement très utile au début de la phase d'acquisition, de manière à fixer les bases et le contexte du problème à résoudre. Cependant, l'apport de connaissances est limité de par la forme idéalisée sous laquelle la résolution des problèmes est présentée. La plupart du temps, l'expert ne prend pas en considération la stratégie de résolution.

Observation

Le cognicien observe la manière de résoudre les problèmes par l'expert. Dans le cas de l'analyse de sécurité en régime permanent, il est difficile d'observer le raisonnement de l'expert lors de situations critiques, car cela demande une présence dans le centre de conduite de l'entreprise et des situations critiques ne se rencontrent pas tous les jours.

Analyse

Le cognicien questionne l'expert. Une analyse critique de situations réelles archivées pour le réseau électrique considéré est effectuée. Cela permet de construire et de rechercher la connaissance nécessaire pour résoudre de manière interactive le problème. C'est le mode d'acquisition qui a été le plus largement utilisé pour constituer la base de règles dans le cas de cette étude.

L'objectif général des discussions avec l'expert consiste à déterminer, pour une certaine situation de charge du réseau, la manière dont l'expert organise la connaissance, représente les concepts nécessaires et les hypothèses. Les discussions doivent également permettre d'identifier la manière avec laquelle l'expert traite les données inconsistantes, non précises ou inutiles pour le problème. Les questions les plus fréquemment posées sont les suivantes :

- Quelles sont les données nécessaires pour traiter le problème ?
- Quelles sont les connaissances utilisées pour traiter cette situation ?
- Quelles sont les contingences critiques ?

- Existe-t-il des solutions pour remédier au déclenchement critique spécifié ?
- Est-ce que le problème peut être traité de manière semblable à un problème déjà observé ou être considéré comme un sous-problème ?
- Quelle est l'explication ou la justification de chaque contingence critique ?

5.2. Considérations générales d'exploitation du réseau

Les connaissances recueillies auprès des experts sont conditionnées par le mode d'exploitation du réseau traité. De manière à situer les considérations effectuées par la suite, ce paragraphe présente les conditions générales d'exploitation du réseau suisse 380KV, 220KV, et 150KV en partie.

L'exploitation du réseau suisse obéit à une politique générale qui dépend non seulement de la nature des moyens de production à disposition, mais également de la situation de la Suisse qui se trouve au coeur du réseau interconnecté européen. Les exploitants doivent mettre à disposition leur réseau pour faciliter l'échange d'énergie avec les pays voisins.

Les bassins d'accumulation constituent une des caractéristiques principales des moyens à disposition pour produire l'énergie. Les moyens de production sont à 57%¹ de nature hydraulique. Ils permettent de stocker l'énergie et de la restituer à un moment opportun. La politique générale des exploitants consiste à valoriser au mieux l'ensemble des moyens de production à disposition. Le mode d'exploitation de l'énergie à disposition est illustré par les figures 5.1 et 5.2². Elles présentent les productions (MW) et les échanges (MW) de chacun des pays membres de l'UCPTE (Union pour la coordination de la production et du transport de l'électricité).

¹Source : Electricité des faits 1990, VSE-UCS

² Source : Bulletin Trimestriel II-1988 de l'UCPTE

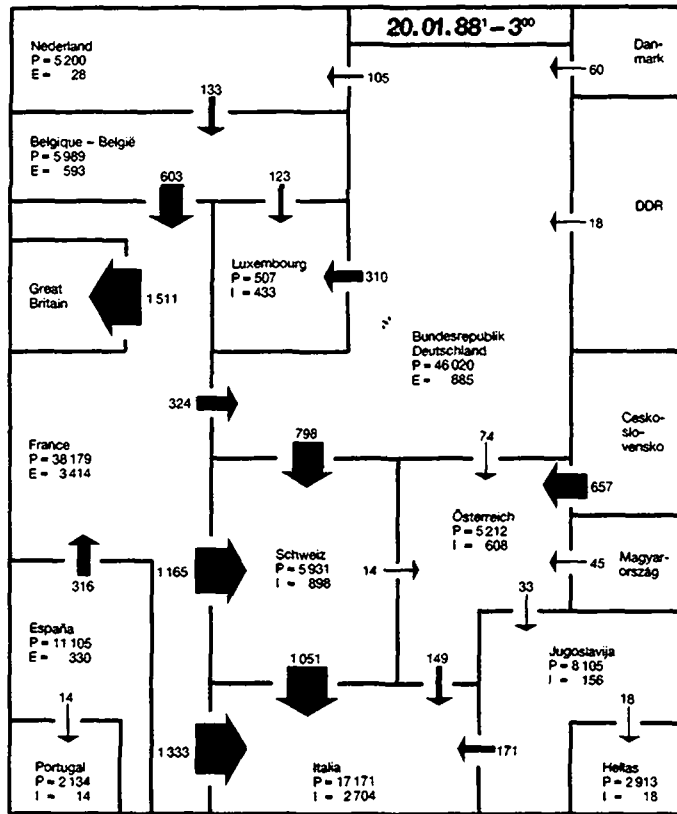


Figure 5.1: Flux d'énergie d'une journée d'hiver (heure creuse)

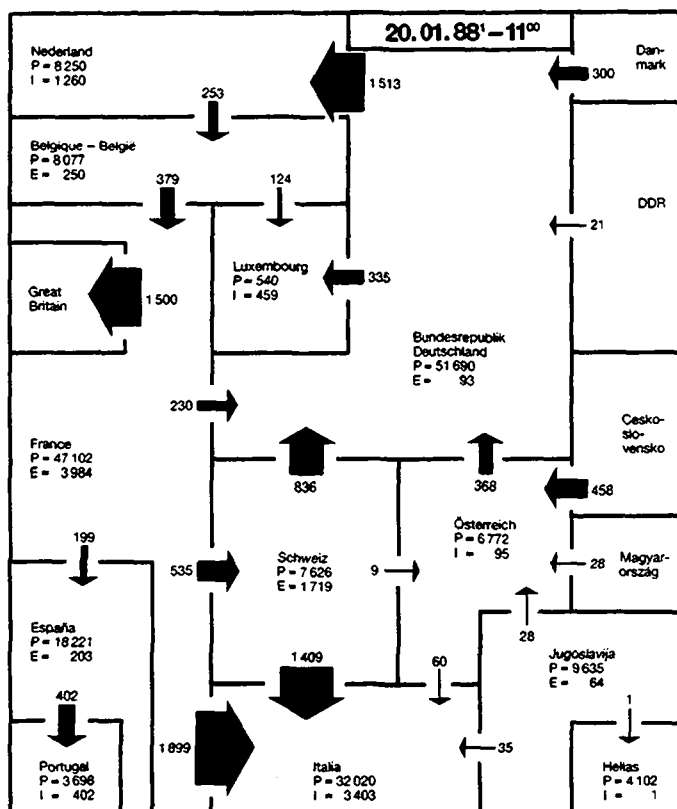


Figure 5.2: Flux d'énergie d'une journée d'hiver (heure pleine)

De manière générale, pendant la journée et plus particulièrement pendant les heures de forte charge, les productions locales permettent de fournir l'énergie nécessaire aux consommateurs qui se trouvent à proximité des unités de production. De par l'exigence d'une exploitation économique des bassins d'accumulation, et en tenant compte du cycle de remplissage d'un bassin, l'eau est principalement turbinée en hiver et en période de forte charge.

Lorsque les groupes de turbinage sont hors service, le réseau transporte essentiellement les échanges d'énergie entre les pays frontaliers à la Suisse. Cette situation correspond à la figure 5.1. Il est nécessaire d'importer de l'énergie pour satisfaire les consommateurs. De plus, si la production au fil de l'eau est faible, l'apport d'énergie importée sera généralement beaucoup plus élevé.

Au contraire, la situation de la figure 5.2 indique clairement que le nombre d'unités de production en service est plus important. Il est nécessaire de transporter l'énergie sur de longues distances, car l'excédent d'énergie produite est exporté.

5.3. Analyse de la connaissance de l'expert

De manière à exploiter la connaissance contenue dans l'analyse de situations critiques par l'expert, il est essentiel d'identifier le contexte de chacune des situations et la manière de juxtaposer les différents facteurs pris en considération. Ce paragraphe présente ces différents facteurs.

La connaissance recensée porte sur l'identification de situations critiques et sur des recommandations qui permettent au réseau de retrouver un état sain. Il a été également demandé aux experts de mentionner une explication pour chacune des contingences critiques. Les principaux facteurs recensés auprès des experts pour caractériser le contexte dans lequel survient une situation critique sont les suivants :

Période de l'année

Les exploitants distinguent principalement la saison de l'année et le jour de la semaine. Les jours fériés sont également pris en considération.

Température extérieure

C'est un facteur important qui va conditionner non seulement la demande, mais également les conditions d'exploitation du réseau électrique. Par exemple, en période de grand froid, la capacité de transport augmente dû au refroidissement. La flèche des lignes est élevée à cause de la charge des lignes ou de la glace qui se forme sur les conducteurs. Par conséquent, le risque de mise à terre est élevé (par exemple, une ligne qui touche la cime d'un arbre).

Production

Ce facteur indique la somme des productions à l'intérieur de la zone électrique.

Demande

Ce facteur indique la demande des consommateurs à l'intérieur de la zone électrique.

Débit des rivières

De manière générale, le débit des rivières conditionne la production au fil de l'eau. Lorsque le débit des cours d'eau est faible, les exploitants doivent suppléer au déficit de production des centrales au fil de l'eau par des productions ou des importations supplémentaires.

Niveau de charge du déclenchement

Ce facteur correspond au niveau de charge relative en % de l'ouvrage(s) déclenché(s).

Niveau de charge d'autres ouvrages

Ce facteur prend en considération l'état de fonctionnement d'équipements qui doivent être examinés pour la contingence analysée. L'état de ces ouvrages est décrit en spécifiant une valeur limite de la charge en %. La présence d'ouvrages hors service ou d'ouvrages fortement chargés sont pris en considération pour exprimer le contexte d'une contingence.

De manière générale, l'expert recourt à de nombreux modes de raisonnement. Ceux-ci sont souvent difficiles ou même impossibles à formaliser. Le raisonnement par classification constitue l'un d'eux. Il consiste, pour l'expert, à se remémorer une situation déjà rencontrée pour traiter une nouvelle situation. Il permet de revenir à un niveau d'abstraction où il est plus facile de manipuler les concepts.

Cependant, ce mode de raisonnement est le plus souvent basé sur des connaissances et des données entachées d'incertitudes et d'imprécisions. L'imprécision de l'expression de la connaissance provient de la nature qualitative du langage. Les experts raisonnent et pensent en utilisant des qualificatifs tels que chaud, froid, assez chaud au lieu de termes numériques précis, telle la température mesurée. De plus, les décisions sont généralement nuancées et non pas tranchées. Parallèlement, les connaissances recueillies auprès de différents experts ne sont pas totalement semblables.

Il faut également prendre en compte la possibilité de l'apparition simultanée de l'incertitude et de l'imprécision dans la connaissance acquise auprès d'un expert. Par exemple : "Si la branche AB est fortement chargée, alors le déclenchement de la branche XY est probablement critique". Au caractère incertain de l'adverbe "probablement" vient se superposer le caractère imprécis du qualificatif "fortement". La notion d'imprécis est liée à l'attribut lui-même, c'est-à-dire la valeur prise. La notion d'incertain s'applique à des connaissances dont la valeur est connue avec plus ou moins de précision.

Trois approches ont été considérées dans le cadre de ce travail. La première est basée sur la théorie des probabilités et plus particulièrement sur l'utilisation du théorème de Bayes. La

deuxième approche est proposée par Dempster et Shafer. Elle constitue une extension de la théorie des probabilités. Ces deux premières approches permettent de prendre en considération l'incertitude associée aux connaissances considérées. Finalement, la troisième approche étudiée est basée sur la théorie de la logique floue. Elle prend en considération l'imprécis et l'incertain associés à un élément de connaissance. C'est finalement cette approche qui a été adoptée pour la modélisation des connaissances recueillies auprès des experts.

5.3.1. Approche basée sur l'utilisation du théorème de Bayes

La notion de probabilité doit être associée à la fréquence d'occurrence de l'élément de connaissance incertain. En considérant le problème à traiter comme une suite dénombrable d'hypothèses indépendantes, le théorème de Bayes peut être appliqué. Cependant, l'utilisation du théorème de Bayes [Haf70] soulève immédiatement les limites d'une telle approche.

- Les hypothèses doivent être mutuellement exclusives. Il n'est pas possible de considérer une indépendance conditionnelle. Par exemple : Si H1 est vrai, alors H2 est vrai.
- Il est nécessaire de connaître la probabilité de chacun des éléments de connaissance.
- La propagation des probabilités peut nécessiter d'importants calculs. De plus, l'introduction d'une nouvelle hypothèse nécessite la modification des probabilités de chacune des hypothèses déjà considérées, car la somme des probabilités doit toujours être égale à l'unité.

Pour toutes ces raisons, l'approche basée sur les probabilités n'a pas été choisie pour le traitement de l'incertitude associée aux connaissances recueillies auprès des experts.

5.3.2. Approche basée sur la théorie de Dempster-Shafer

La théorie de Dempster-Shafer [Sha76] constitue une extension de la théorie des probabilités où le théorème de Bayes apparaît comme un cas particulier. Elle attribue des degrés de croyance à des sous-ensembles d'éléments aussi bien qu'à des éléments de l'ensemble des événements. Elle associe un degré de croyance à une proposition, mais au contraire de la théorie des probabilités, elle n'attribue pas nécessairement le solde de la croyance à sa négation. Le degré de croyance résulte de la confiance accordée à une proposition par une personne. Au contraire des probabilités qui accordent une valeur numérique à un événement sur la base de mesures, le degré de croyance accordé à une proposition ne résulte pas d'une mesure, mais d'un jugement subjectif.

Sans entrer dans les détails de la formulation mathématique de cette théorie, il est cependant possible de considérer les principales définitions de cette théorie. Soit Θ qui constitue l'ensemble des propositions ou événements considérés. Les éléments de Θ sont constitués, par exemple, par l'ensemble des qualificatifs associés à la température (froid, assez froid, chaud, très chaud,...). Soit la fonction $m: 2^\Theta \rightarrow [0,1]$,

$$\sum_{A \subset \Theta} m(A) = 1 \quad (5.1)$$

$$m(\emptyset) = 0$$

La quantité $m(A)$ est appelée la masse de probabilité de A et est comprise comme le degré de croyance associé à A . La deuxième propriété indique qu'il n'y a pas de croyance accordée à l'ensemble vide. La quantité $m(A)$ mesure la croyance accordée à A , mais pas la totalité de croyance associée à A . Pour obtenir la totalité de la croyance accordée à A , il est nécessaire d'additionner les contributions de tous les sous-ensembles B de A .

$$\text{Bel}(A) = \sum_{B \subset A} m(B) \quad (5.2)$$

La fonction $\text{Bel} : 2^{\Theta} \rightarrow [0,1]$ est appelée fonction de croyance sur Θ à partir de masses de probabilité élémentaires. Cette fonction de croyance permet de modéliser des situations courantes avec plus ou moins de connaissances. La plus simple consiste à fixer les masses de probabilité à $m(\Theta) = 1$ et $m(A) = 0$ pour tout $A \neq \Theta$. Par conséquent, $\text{Bel}(\Theta) = 1$ et $\text{Bel}(A) = 0$ pour tout $A \neq \Theta$. La fonction de croyance ainsi obtenue correspond à la situation d'ignorance totale.

A part la croyance associée à un événement A qui correspond à la somme des masses de probabilité affectées à A et à ses sous-ensembles, il est possible de qualifier A à l'aide d'une deuxième mesure appelée plausibilité. La plausibilité est définie comme $1 -$ la somme des masses affectées au complément de A et à ses sous-ensembles. En spécifiant la croyance et la plausibilité pour un événement A ou une proposition, la théorie de Dempster et Shafer définit un intervalle de confiance $[\text{Bel}(A), \text{PL}(A)] \in [0,1]$; la différence égale à $\text{PL}(A) - \text{Bel}(A)$ traduit le degré d'incertitude sur la valeur de probabilité réelle de l'événement ou proposition A .

Soit Bel_1 et Bel_2 deux fonctions de croyance définies pour le même ensemble Θ de propositions, auxquelles sont associées respectivement les masses de probabilité m_1 et m_2 et les éléments A_1, \dots, A_k et B_1, \dots, B_k . Il est alors possible de combiner les deux fonctions Bel_1 et Bel_2 à partir de la règle de Dempster. La nouvelle fonction de croyance est obtenue à partir de leur somme orthogonale :

$$\sum_{A_i \cap B_j = \emptyset} m_1(A_i) \cdot m_2(B_j) < 1 \quad (5.3)$$

$$\text{Bel1} \oplus \text{Bel2} = \frac{\sum_{A_i \cap B_j = A} m1(A_i) \cdot m2(B_j)}{1 - \sum_{A_i \cap B_j = \emptyset} m1(A_i) \cdot m2(B_j)} \quad (5.4)$$

Si la première relation n'est pas vérifiée, alors la somme orthogonale n'est pas définie. En résumé, les avantages principaux de l'utilisation de la théorie de Dempster-Shafer sont les suivants :

- Cette théorie permet de remédier aux désavantages associés à l'utilisation du théorème de Bayes et des probabilités en général. Elle permet d'associer des degrés de croyance à des événements ou propositions et non pas seulement à des événements individuels. Elle permet ainsi de traiter des ensembles d'hypothèses plausibles sans à avoir à se focaliser immédiatement sur une hypothèse élémentaire.
- Au contraire de la théorie des probabilités, et plus particulièrement de l'utilisation du théorème de Bayes, elle permet de raisonner en prenant en compte l'ignorance partielle ou totale. L'utilisation de la règle de Dempster permet de combiner des informations provenant de différentes sources. Il est bien clair que l'utilisation de cette règle peut nécessiter de nombreux calculs pour un raisonnement évolutif.

Faute de données suffisantes, cette théorie n'a pas pu être appliquée au problème de l'analyse de sécurité. Cependant, elle doit pouvoir être introduite pour associer une importance différente à chacune des conditions de la prémisse de la règle. Elle permettrait ainsi de relativiser chacune des conditions à vérifier pour accepter la conclusion d'une règle. D'autre part, elle doit permettre de résoudre les conflits lorsque différentes règles conduisent à un même diagnostic ou à un diagnostic différent. Elle doit permettre de choisir la conclusion de la règle pour laquelle le degré d'incertitude est le plus faible.

5.3.3. Approche basée sur la notion de sous-ensemble flou

Un sous-ensemble flou est simplement une collection d'objets. L'utilisation d'ensembles traditionnels imposent l'appartenance rigide de chacun des objets à l'ensemble. Un objet appartient totalement à l'ensemble ou il n'en fait pas partie. Par exemple, l'ensemble des températures chaudes peut être défini comme toutes les températures comprises entre 20° et 25°. Par conséquent, il n'est pas possible d'associer l'attribut chaud à une température de 19.5°. Cette distinction imposée par l'utilisation d'ensembles rigides apparaît comme irréaliste. Pour remédier à la rigidité des ensembles traditionnels, la notion de sous-ensemble flou a été proposée par Lofti Zadeh [Zad65]. Les idées clés de cette théorie ont été décrites par le philosophe Max Black [Bla37].

La théorie des sous-ensembles flous est récente, mais elle n'est pas à priori une théorie révolutionnaire. La théorie des sous-ensembles flous est une théorie mathématique rigoureuse basée sur un certain nombre d'axiomes [Kli88]. Cependant, les avis divergent sur l'utilité de la

logique floue au sein des mathématiciens. Ces divergences proviennent principalement de la nature subjective de son contenu, car elle est adaptée au traitement de ce qui est incertain. L'approche cartésienne face à un problème consiste à rejeter systématiquement tout ce qui n'est pas mesurable et par conséquent la subjectivité ne peut pas être prise en considération. Cependant la subjectivité ne doit pas être rejetée, car une connaissance est évolutive et devient objective lorsqu'elle est acceptée par un nombre suffisant de personnes. En effet, la définition d'un modèle nécessite la possibilité de pouvoir l'adapter au contenu évolutif et incertain de son environnement.

L'utilisation de la logique floue pose le problème épistémologique suivant : est-il meilleur d'utiliser un modèle certain mais qui représente de trop loin le réel ou un modèle flou qui est beaucoup plus près de la réalité [Kau85]. Il n'y a pas de réponse unique à cette question. Dans la pensée humaine, celle qui construit les modèles, la logique est nuancée, adaptative. Il apparaît évident que les systèmes experts doivent pouvoir exploiter la possibilité de nuancer leurs décisions en faisant appel à la logique floue de manière à se rapprocher de la réalité. L'emploi de la logique floue ne doit pas se généraliser, mais elle doit s'imposer dans toutes les situations où la logique booléenne ne peut pas être appliquée avec efficacité.

Il n'est pas question d'introduire du flou pour des concepts mesurables. Cependant, il y a souvent une confusion entre hasard et incertitude. Le hasard souligne la capacité de mesurer la probabilité d'occurrence de l'événement à partir d'une statistique. Dans tout autre cas il convient de parler d'incertitude. Pour le hasard, il est possible de définir une distribution de probabilité. Au contraire pour l'incertitude, il convient de parler d'une distribution de possibilité ou fonction d'appartenance.

De manière générale, les mathématiques floues permettent d'adapter la sémantique humaine au formalisme mathématique. Les mathématiques classiques ignorent la sémantique à cause de sa subjectivité. C'est une théorie mathématique qui se trouve au carrefour des sensibilités occidentales (esprit cartésien) et orientales (philosophie du yin et du yang). Cependant, la notion de flou a encore un sens péjoratif dans la plupart des langues, excepté peut-être en japonais où le terme "fuzzy" est devenu un argument commercial (caméras, machines à laver,..).

5.4. Sous-ensemble flou

Arnold Kaufmann [Kau85] définit la notion de sous-ensemble flou plutôt que celle d'ensemble flou car le référentiel D auquel appartient le sous-ensemble n'est pas flou. Les sous-ensembles flous permettent de considérer une relation d'appartenance partielle d'un objet à un sous-ensemble tout en garantissant une transition graduelle de l'appartenance à la non-appartenance au sous-ensemble flou (figure 5.3).

Un sous-ensemble flou A appartenant au référentiel D est spécifié par une fonction d'appartenance $\mu_A(x)$ à valeur définie dans $[0,1]$. $\mu_A(x)$ constitue le degré d'appartenance de $x \in A \subset D$ [Hat91].

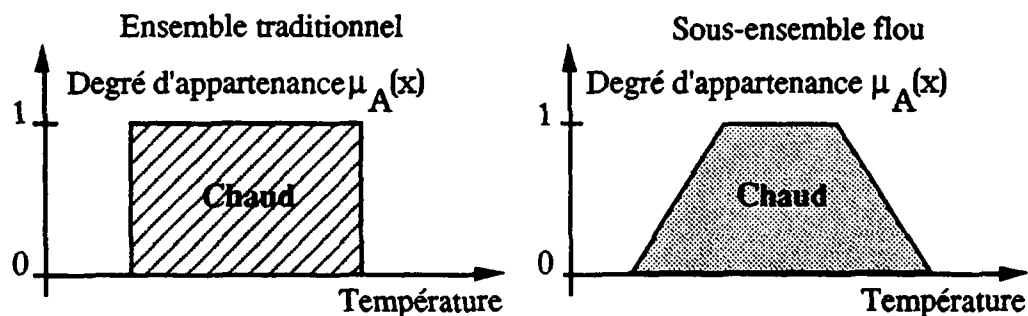


Figure 5.3: Ensemble traditionnel et sous-ensemble flou pour l'attribut "chaud"

La figure 5.4 présente la version traditionnelle et la version floue des sous-ensembles "assez chaud" et "chaud". La version traditionnelle est caractérisée par une transition abrupte d'un sous-ensemble à un autre. Par contre, pour la version floue, la juxtaposition des deux sous-ensembles n'est plus nécessaire. La transition s'effectue de manière graduelle et les deux sous-ensembles présentent une intersection non vide.

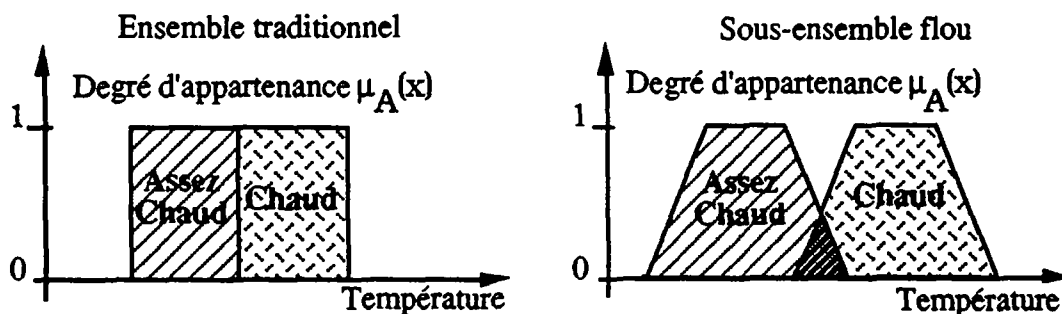


Figure 5.4: Ensemble traditionnel et sous-ensemble flou pour les attributs "assez chaud" et "chaud"

Les fonctions d'appartenance peuvent prendre toutes les formes imaginables. Elles sont le plus souvent approximées par des lignes brisées. Les fonctions d'appartenance trapézoïdales sont fréquemment utilisées de par la simplicité de leur définition.

Contrairement à une distribution de probabilités, la somme des événements d'une fonction d'appartenance ne doit pas être égale à 1. Il suffit que l'appartenance d'un seul événement soit égale à l'unité. Toute fonction d'appartenance comprend un noyau et un support. Le noyau est constitué de l'ensemble des valeurs de x tel que $\mu_A(x) = 1$. Le support est constitué des valeurs de x tel que $\mu_A(x) > 0$ et contient toujours le noyau. Par conséquent, une fonction d'appartenance trapézoïdale est entièrement définie par un quadruplet de nombres (a_1, a_2, a_3, a_4) où $(a_2 - a_1)$ et $(a_4 - a_3)$ désignent la largeur des intervalles du support autour du segment noyau.

En plus de l'imprécis, l'incertain peut facilement être pris en considération à l'aide des fonctions d'appartenance. En effet, il suffit d'élargir la fonction d'appartenance. A l'extrême, lorsqu'une proposition est totalement incertaine, la fonction d'appartenance est égale à l'unité pour toute valeur x de A . La comparaison des fonctions d'appartenance pour le sous-ensemble flou "chaud" associé à la température est présentée à la figure 5.5. Le trapèze de gauche traduit une connaissance imprécise. Celui de droite associe en plus l'incertain avec un degré d'incertitude λ .

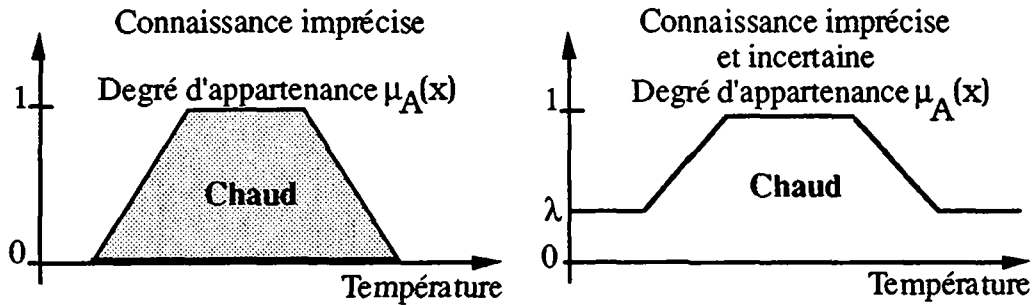


Figure 5.5: Fonction d'appartenance pour une connaissance imprécise et pour une connaissance imprécise et incertaine

5.4.1. Opérations sur des sous-ensembles flous

Différentes opérations élémentaires peuvent être effectuées sur les sous-ensembles flous. Ces opérations sur les sous-ensembles flous A et B satisfont les propriétés des opérations booléennes ci-dessous :

$$\begin{array}{l} A \cap B = B \cap A \\ A \cup B = B \cup A \end{array} \quad \left. \vphantom{\begin{array}{l} A \cap B = B \cap A \\ A \cup B = B \cup A \end{array}} \right\} \text{commutativité}$$

$$\begin{array}{l} (A \cap B) \cap C = A \cap (B \cap C) \\ (A \cup B) \cup C = A \cup (B \cup C) \end{array} \quad \left. \vphantom{\begin{array}{l} (A \cap B) \cap C = A \cap (B \cap C) \\ (A \cup B) \cup C = A \cup (B \cup C) \end{array}} \right\} \text{associativité}$$

$$\begin{array}{l} A \cap (B \cup C) = (A \cap B) \cup (A \cap C) \\ A \cup (B \cap C) = (A \cup B) \cap (A \cup C) \end{array} \quad \left. \vphantom{\begin{array}{l} A \cap (B \cup C) = (A \cap B) \cup (A \cap C) \\ A \cup (B \cap C) = (A \cup B) \cap (A \cup C) \end{array}} \right\} \text{distributivité}$$

$$\begin{array}{l} A \cap A = A \\ A \cup A = A \end{array} \quad \left. \vphantom{\begin{array}{l} A \cap A = A \\ A \cup A = A \end{array}} \right\} \text{idempotence}$$

$$\begin{array}{l} \overline{A \cup B} = \overline{A} \cap \overline{B} \\ \overline{A \cap B} = \overline{A} \cup \overline{B} \end{array} \quad \left. \vphantom{\begin{array}{l} \overline{A \cup B} = \overline{A} \cap \overline{B} \\ \overline{A \cap B} = \overline{A} \cup \overline{B} \end{array}} \right\} \text{théorèmes de De Morgan}$$

Les deux propriétés suivantes ne sont pas semblables aux opérations booléennes :

$$A \cap \overline{A} \neq \emptyset \quad (5.5)$$

$$A \cup \overline{A} \neq D \quad \text{où } D \text{ est le référentiel auquel appartiennent les deux} \quad (5.6)$$

sous-ensembles flous.

Les opérations les plus couramment adoptées sont présentées ci-dessous pour les sous-ensembles flous A et B.

- l'inclusion : $\mu_A(x) \leq \mu_B(x)$ si $A \subseteq B$ (5.7)

- l'égalité : $\mu_A(x) = \mu_B(x)$ si $A = B$ (5.8)

- le complément : $\mu_{\overline{A}}(x) = 1 - \mu_A(x)$ (5.9)

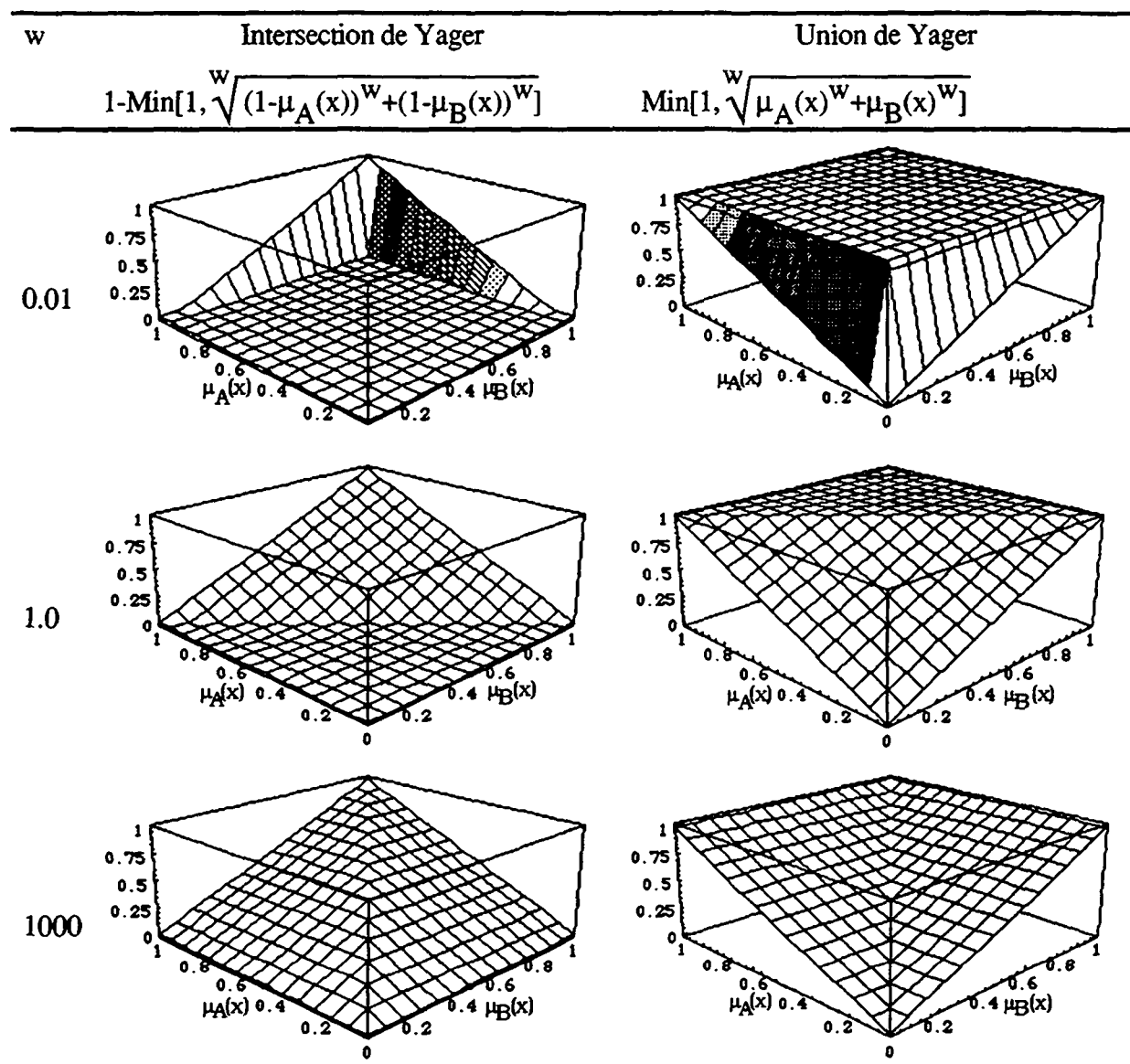
- l'intersection : $\mu_A \cap \mu_B(x) = \min[\mu_A(x), \mu_B(x)]$ [Zad65] (5.10)

- l'union : $\mu_A \cup \mu_B(x) = \max[\mu_A(x), \mu_B(x)]$ [Zad65] (5.11)

- la cardinalité : $|A| = \sum_{x_j \in A} \mu_A(x_j)$ pour tous les éléments x_j de A [Hat91] (5.12)

D'autres choix ont été proposés dans la littérature pour exprimer l'intersection et l'union [Kli88]. Les opérateurs intersection et union proposent principalement une compensation des différences entre les deux sous-ensembles flous comparés. Par exemple, Yager [Kli88] introduit un paramètre w . Le choix de ce paramètre détermine l'importance de l'opération intersection et union pour deux sous-ensembles flous. Le recours à des opérateurs d'intersection et d'union différents de ceux proposés par Zadeh permet l'introduction d'une certaine souplesse comme l'indique le tableau 5.1. Chaque opérateur d'union et d'intersection doit être défini à l'aide d'une fonction continue et doit satisfaire aux axiomes de la logique classique.

Tableau 5.1: Intersection et Union selon Yager



Pour $w = 1$, l'opérateur intersection de Yager retourne une valeur non nulle uniquement si la somme des degrés d'appartenance pour les deux sous-ensembles flous est supérieure à 1. Ce choix de w constitue une mesure d'intersection stricte. Au contraire, lorsque w tend vers l'infini, la mesure d'intersection n'est pas rigide et permet de prendre en compte des degrés d'appartenance faibles pour établir un lien d'intersection. Ce choix correspond à l'approche classique de l'opérateur intersection proposé par Zadeh [Zad65].

Pour l'opérateur union de Yager, la mesure d'union constitue une mesure stricte lorsque w tend vers l'infini. Au contraire, lorsque w tend vers 0, la mesure d'union tend vers 1. L'opérateur de Yager conduit à une opération d'union qui augmente en rigidité lorsque w augmente.

Le paragraphe suivant présente les principales caractéristiques d'une fonction d'appartenance et les conditions qu'elle doit essayer de vérifier. Une fonction d'appartenance est établie comme exemple à partir d'indications recueillies auprès de différents experts.

5.5. Caractéristiques d'une fonction d'appartenance

Lors de la résolution d'un problème à l'aide de la logique floue, la détermination des fonctions d'appartenance pour les différents sous-ensembles flous constitue un des points importants pour la mise en oeuvre de la résolution. D'un point de vue pratique, il convient de distinguer le cas où le sous-ensemble flou A représente une idée correspondant à une catégorie vague de celui où A est déduit de données statistiques. Pour le premier cas, la fonction d'appartenance est établie sur la base d'un questionnaire [Dub85]. Par contre, pour le cas où il est possible de disposer de données statistiques, différents articles proposent des méthodes pour construire des fonctions d'appartenance, soit à partir d'histogrammes [Dev85], soit sur la base des densités de probabilités [Civ86],[Kau85]. Pratiquement, les experts ajustent les distributions d'appartenance sur la base d'observations et, le plus souvent, sur la base de l'analyse des erreurs obtenues à partir d'essais. De par la nature subjective des fonctions d'appartenance, il n'est pas forcément nécessaire de disposer de valeurs exactes pour le degré d'appartenance $\mu_A(x)$. Une erreur faible sur les bornes limites du noyau et du support de la fonction d'appartenance a moins d'importance que lorsque le sous-ensemble flou est remplacé par une approche traditionnelle de la notion d'ensemble.

Différentes conditions et considérations peuvent être imposées pour établir une fonction d'appartenance représentative de la notion considérée :

- L'allure de la fonction d'appartenance représente la nature subjective du comportement flou pris en considération.
- Le nombre de paramètres nécessaires pour représenter la fonction d'appartenance doit être aussi petit que possible, de manière à faciliter sa description.
- Il doit être possible d'établir la fonction d'appartenance à partir d'un nombre restreint d'observations.
- La fonction d'appartenance doit nécessiter un nombre d'opérations restreint, de manière à garantir le succès de sa mise en oeuvre informatique.
- La fonction d'appartenance $\mu_A(x)$ doit être comprise entre 0 et 1. Il n'est pas nécessaire de considérer une échelle infinie pour associer une valeur d'appartenance à x .
- L'intégrale $\int \mu_A^2(x)$ doit être minimisée pour garantir une sélectivité aussi grande que possible de la fonction d'appartenance. Cette exigence n'est pas souhaitable pour tous les problèmes.

En ce qui concerne le problème de l'analyse de sécurité, les fonctions d'appartenance pour les différents sous-ensembles flous doivent être constituées à partir des entretiens avec les exploitants des réseaux électriques. Les informations recueillies sont des idées associées à une catégorie vague, il n'y a pas de données statistiques à disposition.

5.5.1. Exemple de constitution d'une fonction d'appartenance

Soit le sous-ensemble flou "chaud" associé à la variable "température". Quatre experts chargés de l'exploitation d'un réseau électrique ont confié leur définition de la notion de température "chaud".

Expert A : La température est de 25°C

Expert B : La température peut être comprise entre 21°C et 28°C; mais elle se trouve généralement comprise entre 24°C et 27°C.

Expert C : La température est de 24°C; mais elle ne dépasse généralement pas 29°C.

Expert D : La notion de température chaude est incertaine, mais elle est généralement comprise entre 22°C et 26°C.

Les intervalles flous associées à chacune des différentes réponses recueillies auprès des experts sont représentés individuellement à la figure 5.6. Chacun d'eux peut être décrit à l'aide d'un quadruplet de valeur (a1, a2, a3, a4,).

$$A = (25, 25, 25, 25)$$

$$B = (21, 24, 27, 28)$$

$$C = (24, 24, 24, 29)$$

$$D = (22, 22, 26, 26)$$

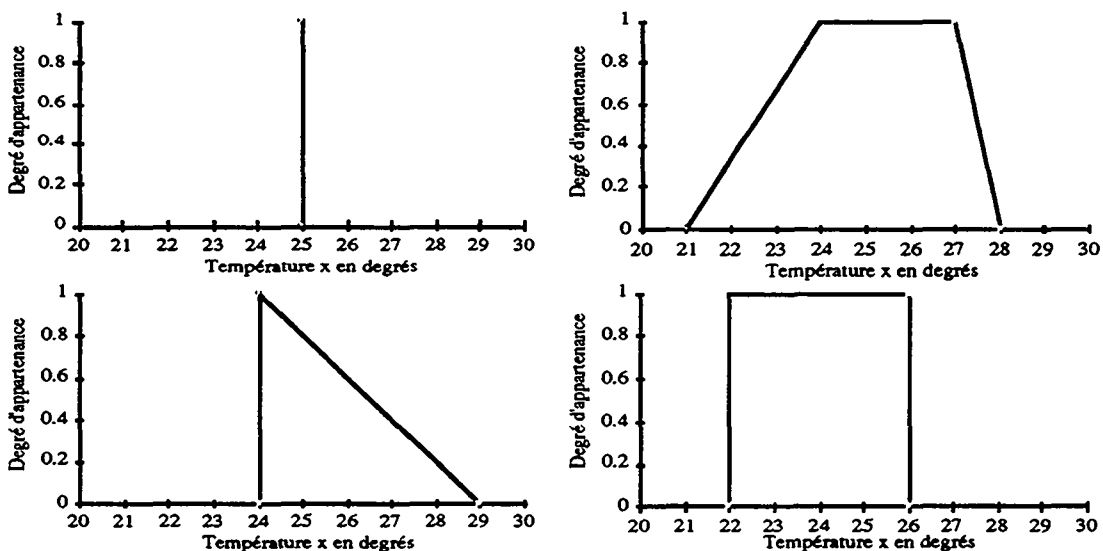


Figure 5.6: Définitions des experts pour le sous-ensemble flou "chaud"

Pour construire la fonction d'appartenance associée au sous-ensemble flou température chaude, il est nécessaire d'effectuer la synthèse des différentes observations recueillies auprès des experts. Pour deux sous-ensembles flous trapézoïdaux à support borné, Dubois [Dub85] propose de construire un nouveau sous-ensemble flou trapézoïdal $f(A,B)$ selon la règle suivante:

$$f(A,B) = (f(a1, b1), f(a2, b2), f(a3, b3), f(a4, b4)) \quad (5.13)$$

L'application de cette fonction au calcul du sous-ensemble flou E température "chaud", à partir des connaissances recueillies auprès des experts, peut être envisagé de différentes manières :

$$E1 = A \cup B \cup C \cup D$$

$$= (\max(a1, b1, c1, d1), \max(a2, b2, c2, d2), \max(a3, b3, c3, d3), \max(a4, b4, c4, d4))$$

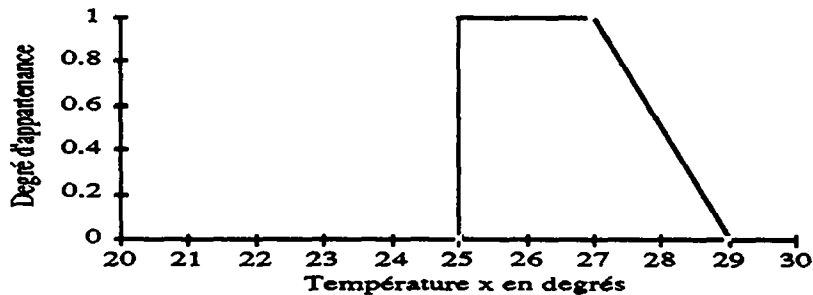


Figure 5.7: Sous-ensemble flou E1

$$E2 = A \cap B \cap C \cap D$$

$$= (\min(a1, b1, c1, d1), \min(a2, b2, c2, d2), \min(a3, b3, c3, d3), \min(a4, b4, c4, d4))$$

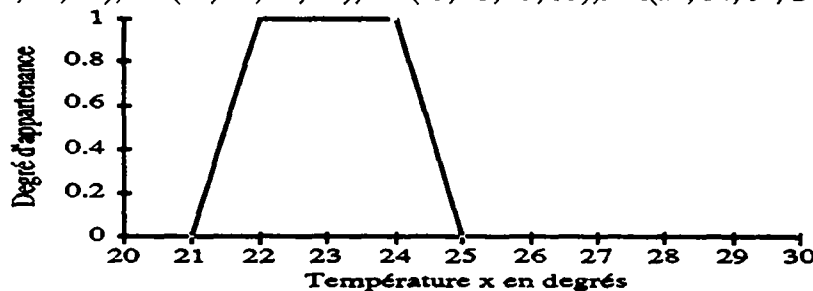


Figure 5.8: Sous-ensemble flou E2

$$E3 = (\min(a1, b1, c1, d1), \min(a2, b2, c2, d2), \max(a3, b3, c3, d3), \max(a4, b4, c4, d4))$$

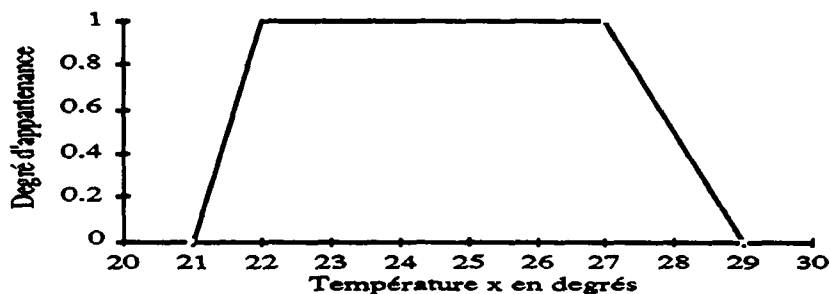


Figure 5.9: Sous-ensemble flou E3

Il n'y a pas une des trois définitions qui s'impose à priori. D'autres relations peuvent être envisagées pour effectuer une synthèse des connaissances recueillies auprès des experts. Il est par exemple possible de superposer une valeur d'incertitude λ pour un intervalle de température de manière à tenir compte du contenu incertain spécifié par l'expert D. De par la nature subjective des connaissances considérées, le choix d'une fonction d'appartenance devra être effectué en analysant le comportement du système et en modifiant l'une ou l'autre des trois définitions proposées jusqu'à obtenir une fonction d'appartenance satisfaisante.

5.6. Filtrage flou d'une proposition

Les règles comprenant de la logique floue sont semblables aux règles de production traditionnelles d'un système expert. Elles comprennent une partie prémisses constituée de une ou plusieurs propositions floues et une conclusion comprenant une ou plusieurs conséquences ou actions. De manière générale, une proposition floue est de la forme "X est F". X est une variable qui peut prendre des valeurs comprises dans le référentiel D et F constitue un sous-ensemble flou. Le terme de proposition floue est utilisé pour parler d'une proposition dont la vérité est affirmée tout en sachant qu'elle contient du flou. Il convient de distinguer les propositions floues imprécises des propositions non floues imprécises. La "température est chaude" correspond à une proposition floue imprécise. La "température est comprise entre 35° et 37°" constitue une proposition non floue imprécise.

Le raisonnement par classification nécessite la comparaison de deux propositions où la première "X est A" est donnée. Cette première proposition est mise en relation avec la deuxième proposition "X est B". B constitue un sous-ensemble flou associé au référentiel D. La première proposition est filtrée sur la base de la deuxième proposition, de manière à déterminer son acceptation. La comparaison des deux propositions peut être caractérisée par deux quantités, $P(B/A)$ et $N(B/A)$, qui représentent respectivement la possibilité et la nécessité que "X soit B" tout en sachant que "X est A". Par exemple, cela signifie la possibilité et la nécessité que la température soit chaude tout en sachant que la température est de 25°.

$P(B/A)$ constitue le degré d'intersection de A et B. Si les noyaux de A et B ont une intersection non vide, cette quantité est égale à 1. Il est alors totalement possible que A et B soient semblables. Par contre, si l'intersection des supports de A et B est nulle, il est impossible que A s'apparie à B.

$N(B/A)$ correspond au degré d'inclusion de A dans B. Si le support de A est inclus dans le noyau de B, il est certain que A s'apparie à B et la nécessité $N(B/A)$ est égale à 1. Si une partie du noyau de A n'est pas contenue dans le support de B, $N(B/A)$ est alors nulle.

Qualitativement, les deux mesures $P(B/A)$ et $N(B/A)$ sont caractérisées par les règles suivantes:

Mesure de possibilité

- SI les noyaux des deux sous-ensembles flous A et B ont une intersection non nulle, ALORS $P(B/A) = 1$
- SI l'intersection des supports des deux sous-ensembles flous A et B est nulle, ALORS $P(B/A) = 0$

Mesure de nécessité

- SI le support du sous-ensemble flou A est contenu dans le noyau du sous-ensemble flou B, ALORS $N(B/A) = 1$

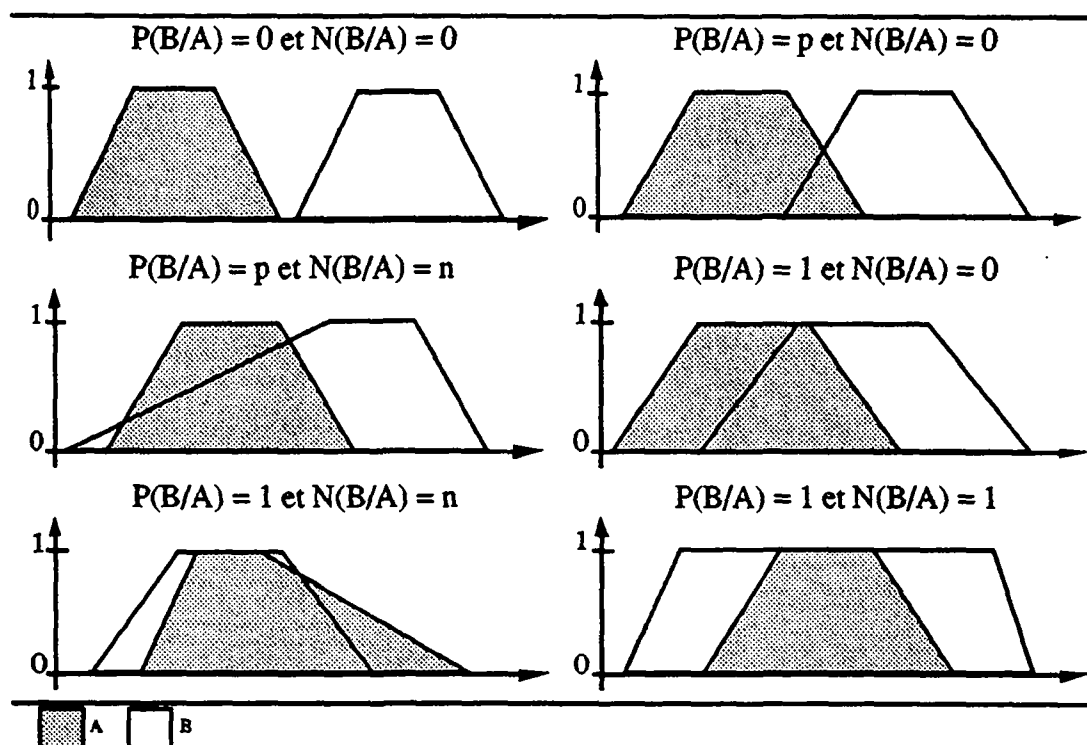
- SI une partie du noyau du sous-ensemble flou A n'est pas contenue dans le support du sous-ensemble flou B, ALORS $N(B/A) = 0$

Pour deux distributions quelconques de possibilités, il apparaît clairement que le temps de calcul de ces deux grandeurs peut être important. En considérant une fonction d'appartenance trapézoïdale pour chacun des sous-ensembles flous, ce temps de calcul des différentes mesures peut être considérablement réduite. Les équations utilisées par Haton [Hat91] pour calculer les deux mesures $P(B/A)$ et $N(B/A)$, dans le cas d'une distribution trapézoïdale, sont proposées dans l'annexe B. Le niveau d'acceptation d'une proposition floue est basé sur la relation entre les deux mesures "possibilité" et "nécessité". Les différentes combinaisons de valeurs $P(B/A)$ et $N(B/A)$ peuvent être groupées en neuf catégories. Les niveaux d'acceptation de six des neuf combinaisons sont présentés dans le tableau 5.2 et illustrés dans le tableau 5.3.

Tableau 5.2: Combinaisons de $P(B/A)$ et $N(B/A)$

	$P(B/A) = 0$	$P(B/A) = p$	$P(B/A) = 1$
$N(B/A) = 0$	inacceptable	peut-être inacceptable	inconnu
$N(B/A) = n$	-	entre deux	peut-être acceptable
$N(B/A) = 1$	-	-	acceptable

Tableau 5.3: Différentes combinaisons de sous-ensembles flous



Les valeurs p et n sont strictement comprises entre $]0,1[$. En se basant sur les règles proposées ci-dessus et les équations de l'annexe B, il peut être démontré que les trois combinaisons indiquées par "-" ne sont pas possibles et $P(B/A) \geq N(B/A)$.

Cependant, il n'est pas possible de déterminer clairement le niveau d'acceptation de quatre combinaisons du tableau 5.2. Il est nécessaire d'introduire une troisième mesure appelée "mesure d'intersection relative" $IR(B/A)$. Elle correspond au rapport de la surface commune des deux sous-ensembles flous et de la surface associée à la proposition A. Si la fonction d'appartenance de A est totalement incluse dans la fonction d'appartenance de B, alors $IR(B/A)$ est égale à l'unité. De manière générale, $IR(B/A)$ est comprise entre $[N(B/A), P(B/A)]$. La mesure de $IR(B/A)$ peut être considérablement simplifiée pour le cas où le sous-ensemble flou associé à A se résume à la valeur mesurée. Elle est alors égale à $\mu_A(x)$.

Mesure d'intersection relative

- SI la fonction d'appartenance du sous-ensemble flou A est entièrement contenue dans la fonction d'appartenance du sous-ensemble flou B, $\mu_A(x) \leq \mu_B(x)$,
ALORS $IR(B/A) = 1$

$$IR(B/A) = \frac{|B \cap A|}{|A|} \quad \text{où } A = \{x \mid \mu_A(x) \neq 0\} \text{ et } B = \{x \mid \mu_B(x) \neq 0\} \quad (5.14)$$

Le calcul des grandeurs "possibilité", "nécessité" et "intersection" est présenté dans l'annexe B pour une distribution trapézoïdale.

5.7. Application à l'analyse de sécurité

La connaissance recueillie auprès des experts est utilisée par le système expert pour attacher un diagnostic à une contingence. Le diagnostic émis dépend des règles de production déclenchées par le moteur d'inférence. Dans un système expert traditionnel, la partie action d'une règle de production est déclenchée si sa partie prémisse est totalement vraie. Par contre, dans un système expert flou, une règle est déclenchée au moment où le degré de vérité de la prémisse dépasse un seuil. Par défaut, ce seuil est considéré comme nul. Par conséquent, toute règle dont la partie prémisse concerne la contingence analysée contribue au diagnostic final. Au contraire des règles utilisées par un système expert traditionnel, l'utilisation de règles floues permet de nuancer le diagnostic en combinant les résultats de l'inférence de plusieurs règles imprécises. Plus la prémisse d'une règle est semblable aux entrées, plus la conclusion de la règle contribue au diagnostic final.

Ce paragraphe décrit d'une part les sous-ensembles flous considérés pour chacun des attributs, et d'autre part la manière d'effectuer l'adéquation de la situation courante du réseau avec les propositions qui constituent la partie prémisse des règles de production.

5.7.1. Filtrage flou dans le cas de l'analyse de sécurité

Les différents facteurs considérés par les experts d'un réseau électrique pour l'analyse de sécurité doivent être exprimés sous la forme de variables floues avant de pouvoir être utilisés dans un système expert. Les variables X_i se réfèrent aux quantités physiques considérées, comme la température (X_1) ou la demande dans une zone électrique (X_3). Les variables B_{ij} correspondent aux descriptions linguistiques associées à la variable X_i . Par exemple, X_1 peut être décrit comme "très froid" (B_{11}), ou "froid" (B_{12}). Chacun des sous-ensembles flous B_{ij} est décrit à l'aide d'une distribution trapézoïdale d'appartenance. Le quadruplet des nombres réels associé à la distribution est obtenu sur la base de l'analyse des discussions menées auprès des experts. Il n'a pas été associé une notion de sous-ensemble flou pour l'attribut "période de l'année"; cependant, il est possible de l'introduire.

Température

Pour la température extérieure, cinq sous-ensembles flous B_{1j} sont pris en considération :

"Très froid", "froid", "normal", "chaud" et "très chaud".

Production

Le bilan des unités de production est effectué pour la zone électrique considérée. La zone comprend le sous-ensemble des équipements appartenant à la société d'exploitation. Trois sous-ensembles flous B_{2j} sont associés à cet attribut :

"élevée" : la production de la zone est supérieure à la charge (exportation).
 "moyenne" : la production de la zone couvre la charge.
 "insuffisante" : la production de la zone est inférieure à la charge (importation).

Demande

Le bilan de la demande est effectué pour la zone électrique considérée. Trois sous-ensembles flous B_{3j} sont associés à cet attribut en se basant sur la demande de pointe observée pour la zone considérée.

"élevée", "moyenne", "faible"

Débit des rivières

Ce facteur considère le débit des rivières pour lesquelles il existe une centrale de production au fil de l'eau dans la zone électrique. Trois sous-ensembles flous B_{4j} sont associés à cet attribut :

"élevé" : le débit est en dessus de la moyenne.
 "moyen" : le débit est moyen.
 "faible" : le débit est inférieur à la moyenne.

Niveau de charge du déclenchement

Cet attribut prend en considération la charge courante de l'ouvrage ou des ouvrages déclenché(s). Trois sous-ensembles flous B_{5j} sont associés à la valeur relative de la charge spécifiée.

"très proche de", "proche de", "environ"

Niveau de charge d'autres ouvrages

Pour les ouvrages à prendre en considération, trois sous-ensembles flous B_{6j} sont associés à la charge relative de l'ouvrage.

"très proche de", "proche de", "environ"

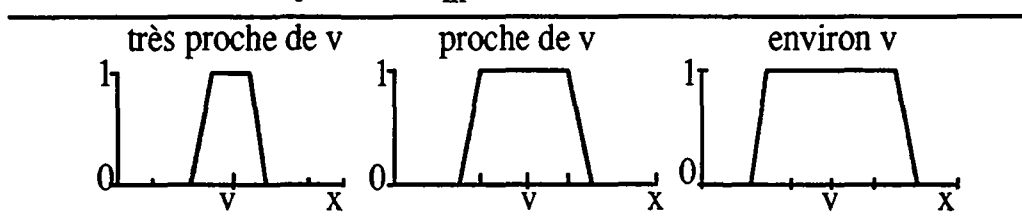
La charge des ouvrages est obtenue sur la base de l'estimation d'état pour le fonctionnement courant du réseau. Les variables X_i et les sous-ensembles flous associés sont résumés dans le tableau 5.4

Tableau 5.4: Variables X_i et sous-ensembles flous associés

X_i		B_{i1}	B_{i2}	B_{i3}	B_{i4}	B_{i5}
X_1	Température	très froid	froid	normal	chaud	très chaud
X_2	Production	élevée	moyenne	insuffisante		
X_3	Demande	élevée	moyenne	faible		
X_4	Débit des rivières	élevé	moyen	faible		
X_5	Niveau de charge du déclenchement	très proche de	proche de	environ		
X_6	Niveau de charge d'autres ouvrages	très proche de	proche de	environ		

La notation A_{ik} indique une quantité floue associée à une mesure ou une connaissance obtenue en temps réel. Pour chaque variable X_i , il est nécessaire de disposer d'une mesure correspondante. A chaque valeur mesurée est associée une des trois fonctions d'appartenance; chacune d'elles correspond à un niveau de précision pour la valeur mesurée. Les variables A_{ik} (A_{i1} , A_{i2} , A_{i3}), représentées dans le tableau 5.5, indiquent les différents niveaux d'imprécision associés à la valeur mesurée.

Tableau 5.5: Niveaux d'imprécision A_{ik}



L'analyse de sécurité est effectuée en utilisant une base de connaissances. Chaque règle dans la base de connaissances comprend une prémisse et une conclusion. La prémisse est constituée d'une combinaison de propositions floues et non floues. Si toutes les conditions sont satisfaites, la conclusion de la règle indique si elle est critique ou non. Pour une contingence critique, une liste des principaux ouvrages surchargés est spécifiée. La conclusion de la règle peut également comprendre une liste d'actions à effectuer par l'opérateur pour permettre au réseau de réintégrer un état normal. Sous une forme générale, une règle s'exprime de la manière suivante:

SI Identification de la zone est C1
 ET Type de contingence est C2
 ET Noeuds aux deux extrémités de l'ouvrage(s) sont C3 and C4
 ET Saison et jour d'exploitation du réseau sont C5 and C6

(commentaire: les quatre propositions ci-dessus ne sont pas floues)

[ET Température X_1 est B_{1j}]
 [ET Production de la zone électrique en MW X_2 est B_{2j}]
 [ET Demande de la zone électrique en MW X_3 est B_{3j}]
 [ET Débit X_4 est B_{4j}]
 [ET Niveau de charge de l'équipement(s) déclenché(s) en % X_5 est B_{5j}]
 [ET Niveau de charge d'autres équipements en % X_6 est B_{6j}]

(commentaire: les six propositions ci-dessus sont floues et les crochets indiquent que certaines propositions peuvent ne pas être prises en considération pour une règle spécifique.)

ALORS Contingence est C7,
 [Violations de contraintes thermiques peuvent exister pour le(s) équipement(s) C8],
 [Actions suggérées suivantes C9].

(commentaire: les crochets indiquent que certaines conclusions peuvent ne pas être spécifiées.)

Les variables C_i sont définies de la manière suivante:

C1: Nom de la zone électrique
 C2: Simple ou double; ligne(s) ou transformateur(s); niveau de tension de l'équipement(s)
 C3,C4: Nom des noeuds
 C5: Hiver heure pleine, hiver heure creuse, été heure pleine, été heure creuse
 C6: Jour de la semaine
 C7: Critique ou non-critique
 C8: Liste des branches avec des surcharges
 C9: Liste des actions pour remédier aux conséquences de la contingence (Fermeture/ouverture de lignes, réduction des exportations, réduction des productions, etc.)

Les mesures et informations provenant du système d'acquisition en temps réel sont rassemblées sous la forme d'un ensemble de propositions $\{X_i \text{ est } A_{ij}\}$. Ces premières propositions sont filtrées en utilisant les propositions $\{X_i \text{ est } B_{ij}\}$ de la partie prémisses de la règle. Le filtrage basé selon le tableau 5.2 fournit une estimation du degré d'acceptation des premières propositions. Comme mentionné dans la section 5.7, la mesure d'intersection relative est introduite pour réduire l'ambiguïté associée à l'acceptation d'une règle sur la base des deux premières mesures. Soit une proposition dont le niveau d'acceptation ne peut pas être estimé sur la base uniquement des mesures $P(B/A)$ et $N(B/A)$, si $IR(B/A)$ est plus grande qu'un seuil, alors la proposition est jugée acceptable.

5.7.2. Niveau d'acceptation d'une règle

Pour chacune des règles concernant la contingence courante, les propositions floues doivent être validées en les comparant à l'état courant du réseau électrique. Considérant la situation courante A et la situation B décrite par la règle, l'adéquation de B à A doit être vérifiée de la manière suivante :

- Evaluer le niveau d'acceptation de chacun des attributs en utilisant les grandeurs "possibilité" $P(B_i/A_i)$ et "nécessité" $N(B_i/A_i)$.
- Déterminer le coefficient de possibilité CP de la règle en évaluant le produit cartésien des prémisses composées floues.

$$\begin{aligned} CP &= P(B_{1j} \times B_{2j} \times B_{3j} \times B_{4j} \times B_{5j} \times B_{6j} / A_{1k} \times A_{2k} \times A_{3k} \times A_{4k} \times A_{5k} \times A_{6k}) \quad (5.17) \\ &= \min(P(B_{1j}/A_{1k}), P(B_{2j}/A_{2k}), P(B_{3j}/A_{3k}), P(B_{4j}/A_{4k}), P(B_{5j}/A_{5k}), P(B_{6j}/A_{6k})) \end{aligned}$$

La règle ci-dessous est utilisée pour intégrer les résultats du filtrage flou de différentes conditions:

- SI toutes les propositions de la partie prémisses de la règle sont acceptables, ALORS le coefficient de possibilité CP est attribué à la partie conclusion de la règle.

S'il y a plus d'une règle qui est peut être associée à la contingence examinée, il convient de prendre en considération celle qui a le niveau d'acceptation le plus élevé. En d'autres mots:

- SI il y a plusieurs règles acceptables pour la contingence considérée, ALORS la conclusion avec le coefficient de possibilité CP le plus élevé est acceptée.

5.8. Intégration de la logique floue dans Nexpert Object

Cette section se base sur le choix du logiciel de Nexpert Object pour le développement du système expert (cf. 6.2.1).

A la base, Nexpert Object n'offre pas la possibilité d'introduire une notion de flou. Il a été nécessaire d'intégrer cette fonctionnalité à l'aide d'une structure d'objets définie à l'aide de classes. Le degré d'acceptation des règles doit être également géré de manière explicite. Un ensemble de règles identifie dans une base de données les règles qui se rapportent à la contingence analysée. Pour chacune d'elles, le degré d'acceptation est déterminé sur la base de l'évaluation de chacune des propositions de la partie prémisse de la règle en cours d'évaluation. Les classes "sous-ensemble flou" et "variable floue" utilisées pour le traitement des sous-ensembles flous sont présentées ci-dessous.

5.8.1. La classe "sous-ensemble flou"

La base de l'intégration de la logique floue est constituée par la définition de la classe "sous-ensemble flou" (figure 5.10). Un sous-ensemble flou est défini à l'aide d'une fonction d'appartenance dont les valeurs sont comprises entre 0 et 1. La description des fonctions d'appartenance a été limitée à des fonctions générées à partir de trapèzes. Différentes fonctions peuvent être définies à partir du quadruplet de nombres réels (a_1, a_2, a_3, a_4) où $a_1 \leq a_2 \leq a_3 \leq a_4$.

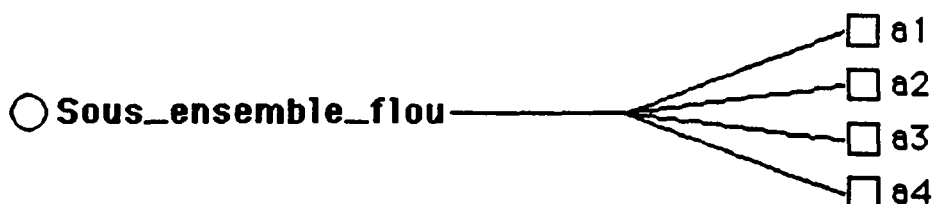


Figure 5.10: La classe "sous-ensemble flou"

5.8.2. La classe "variable floue"

La classe "variable floue" est utilisée pour représenter des variables linguistiques X_i auxquelles sont associées un certain nombre de sous-ensembles flous B_{ij} . Avec Nexpert Object, les sous-ensembles flous sont associés à une variable à l'aide de la notion de sous-objet. La figure 5.11 illustre la structure de cette classe en présentant la variable X_i et ses sous-ensembles flous B_{ij} .

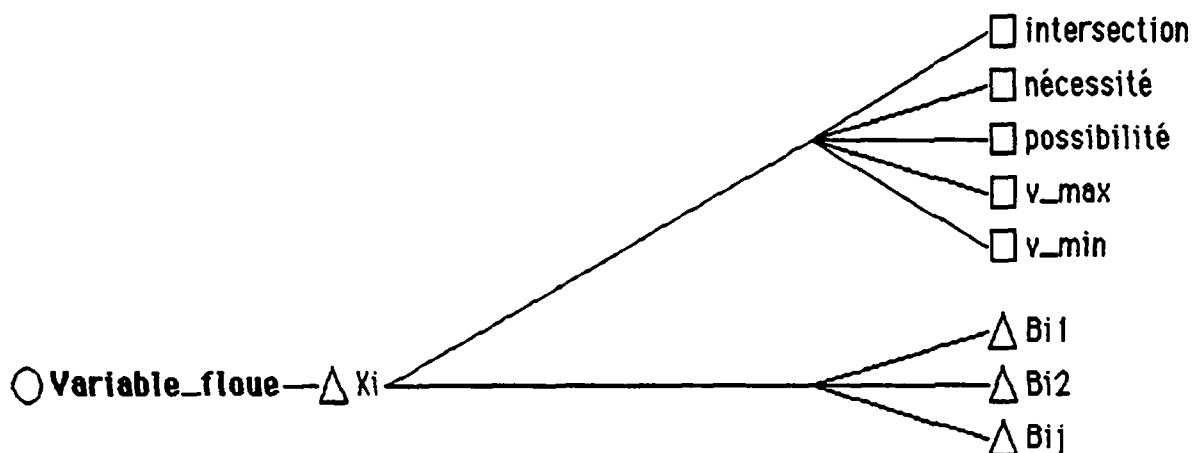


Figure 5.11: La classe "variable floue"

Les propriétés de la classe "variable floue" ont la signification suivante:

- V_{min}, v_{max}
Ces deux propriétés définissent le référentiel auquel la variable floue appartient. Par exemple, la variable "température" est définie dans l'intervalle -40 à +60 degrés Celsius.
- Possibilité, Nécessité, Intersection
Les slots de ces trois propriétés contiennent les mesures $P(B/A)$, $N(B/A)$ et $IR(B/A)$ calculées à partir de la valeur mesurée pour la variable X_j considérée. La valeur du slot est définie en considérant le meta-slot associé.

5.9. Application numérique

Ce paragraphe présente les résultats numériques obtenus pour une contingence proposée par un opérateur. Le tableau 5.6 résume le scénario considéré en exprimant chacun des sous-ensembles flous A_{ij} et B_{ik} . Les valeurs spécifiées pour les sous-ensembles flous A_{ijk} sont obtenues à partir des valeurs temps réel correspondant à l'état courant du réseau examiné.

Tableau 5.6: Propositions floues du scénario considéré

X_j	Mesures en temps réel	Description de X_j
X_1	A_{13} environ 2°	B_{12} froide
X_2	A_{22} proche de 480MW	B_{23} faible
X_3	A_{32} proche de 1878MW	B_{31} élevée
X_4	A_{51} très proche de 73 %	B_{53} environ 80%
X_5	A_{62} proche de 68 %	B_{63} environ 75%

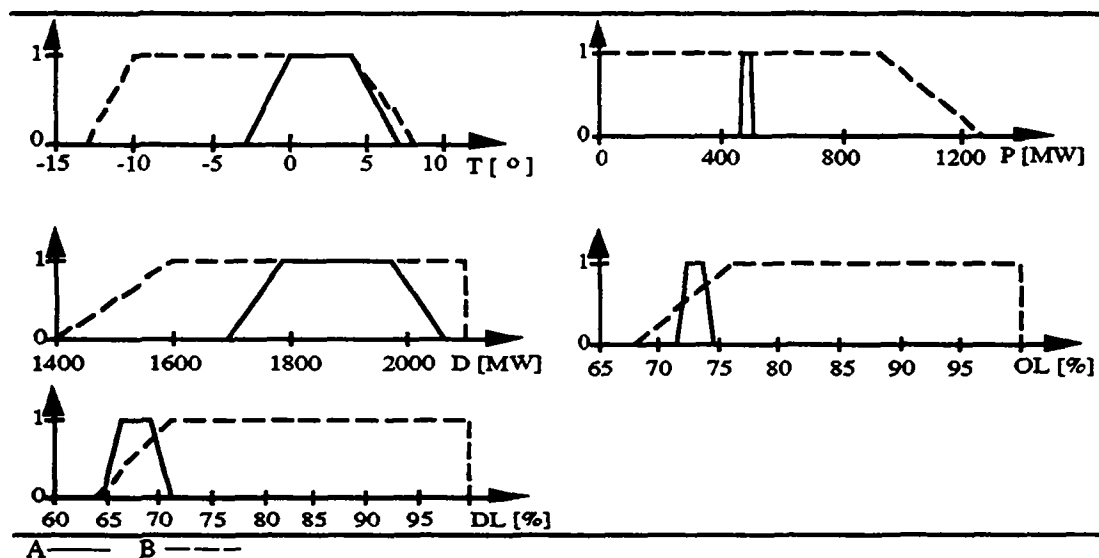
Le nombre de sous-ensembles flous doit être égal au nombre de fonctions d'appartenance. L'information associée aux dix fonctions d'appartenance est spécifiée dans le tableau 5.7. Le tableau 5.8 contient les représentations graphiques de chacune des fonctions d'appartenance.

Tableau 5.7: Définition des fonctions d'appartenance pour les sous-ensembles flous.

	a1	a2	a3	a4
A_{13}	$(T_m - 5)^\circ$	$(T_m - 2)^\circ$	$(T_m + 2)^\circ$	$(T_m + 5)^\circ$
A_{22}	$0.95 * P_m$	$0.98 * P_m$	$1.02 * P_m$	$1.05 * P_m$
A_{32}	$0.90 * D_m$	$0.95 * D_m$	$1.05 * D_m$	$1.10 * D_m$
A_{51}	$0.98 * O L_m$	$0.99 * O L_m$	$1.01 * O L_m$	$1.02 * O L_m$
A_{62}	$0.95 * D L_m$	$0.98 * D L_m$	$1.02 * D L_m$	$1.05 * D L_m$
B_{12}	-13°	-10°	4°	8°
B_{23}	0	0	$0.4 * P_i$	$0.55 * P_i$
B_{31}	$0.70 * D_p$	$0.80 * D_p$	$1.05 * D_p$	$1.05 * D_p$
B_{53}	$0.85 * O L$	$0.95 * O L$	100%	100%
B_{63}	$0.85 * D L$	$0.95 * D L$	100%	100%

T_m :	Température
P_m :	Production totale en MW
P_i :	Unités de production installées (2300MW)
D_m :	Demande total en MW
D_p :	Demande de pointe en MW (2000MW)
OL_m :	Charge relative en % de l'ouvrage déclenché
OL :	Valeur limite de la charge de l'ouvrage déclenché, spécifiée dans la prémisse de la règle
DL_m :	Charge relative en % de l'ouvrage considéré
DL :	Valeur limite de la charge de l'ouvrage considéré, spécifiée dans la prémisse de la règle

Tableau 5.8: Fonctions d'appartenance pour le scénario spécifié



La règle extraite de la base de connaissances est exprimée de la manière suivante :

SI Identification de la zone est 2
 ET Type de contingence est un déclenchement simple d'une ligne 220KV
 ET Noeuds aux deux extrémités de l'ouvrage sont Bus23 et Bus216
 ET Période d'exploitation est hiver heure pleine
 ET Température est froide (X_1 est B_{12})
 ET Production de la zone électrique est faible (X_2 est B_{23})
 ET Demande de la zone électrique est élevée (X_3 est B_{31})
 ET Niveau de charge de la ligne est environ de 80% (X_5 est B_{53})
 ET Niveau de charge des transformateurs Bus33 - Bus23 est environ de 75% (X_6 est B_{63})
 ALORS Contingence est critique et les lignes suivantes seront probablement surchargées:

- Bus23 - Bus21
- Bus13 - Bus12, Bus12 - Bus116, Bus116 - Bus112, Bus112 - Bus117

Les résultats de l'application du filtrage flou sont résumés dans le tableau 5.9. L'annexe D contient une représentation graphique du réseau auquel appartient la contingence.

Tableau 5.9: Résumé du filtrage flou pour l'acceptation des propositions B_{ij}

	$P(B_{ij} / A_{jk})$	$N(B_{ij} / A_{jk})$	Acceptation
(B_{12} / A_{13})	1	0.57	peut-être acceptable
(B_{23} / A_{22})	1	1	acceptable
(B_{31} / A_{32})	1	1	acceptable
(B_{53} / A_{51})	0.74	0.49	entre deux
(B_{63} / A_{62})	0.8	0.3	entre deux

Sur la base du tableau 5.9, les deux propositions "X₂ est B₂₃" et "X₃ est B₂₃" sont acceptables, mais le niveau d'acceptation des trois autres propositions est toujours ambigu. De manière à déterminer plus précisément le niveau d'acceptation de ces trois propositions, il est nécessaire de calculer la mesure d'intersection relative $IR(B_{ij}/A_{jk})$. Les résultats obtenus sont les suivants :

$$\begin{aligned} IR(B_{12} / A_{13}) &= 1.0, \\ IR(B_{53} / A_{51}) &= 0.7, \\ IR(B_{63} / A_{62}) &= 0.63. \end{aligned}$$

En considérant un seuil égal à 0.5 pour la mesure d'intersection relative, les trois propositions sont jugées acceptables pour le seuil spécifié. Le coefficient de possibilité CP associé à la conclusion de la règle est obtenu en effectuant le produit cartésien des mesures individuelles de possibilité $P(B_{ij}/A_{jk})$:

$$\begin{aligned} CP &= P(B_{12} \times B_{22} \times B_{31} \times B_{53} \times B_{63} / A_{13} \times A_{21} \times A_{32} \times A_{51} \times A_{62}) \\ &= \min(P(B_{12}/A_{13}), P(B_{23}/A_{22}), P(B_{31}/A_{32}), P(B_{53}/A_{51}), P(B_{63}/A_{62})) \\ &= \min(1, 1, 1, 0.74, 0.8) = 0.74 \end{aligned}$$

Pour le scénario considéré, seule une règle est déclenchée. Par conséquent, la conclusion de la règle est acceptée avec un coefficient de possibilité égal à 0.74. En d'autres mots, le déclenchement spécifié de la ligne 220KV est critique pour le régime de fonctionnement considéré et trois lignes seront probablement surchargées.

5.10. Conclusion

Ce chapitre est principalement consacré à la modélisation et l'utilisation de la connaissance recueillie auprès des exploitants d'un réseau électrique. La méthode proposée est basée sur l'utilisation de la logique floue. L'utilisation des techniques floues permet un traitement flexible des connaissances acquises. De par la nature imprécise et incertaine des connaissances recueillies, l'utilisation de propositions floues permet de prendre en considération des règles qui auraient été écartées sur la base d'une approche traditionnelle de la logique.

L'utilisation du filtrage flou est proposée pour déterminer le niveau d'acceptation de chaque règle en considérant les mesures en temps réel obtenues pour l'état de fonctionnement du réseau. Finalement, l'approche proposée nécessite un effort de calcul réduit pour le traitement de propositions floues.

De manière générale, un système expert doit comprendre d'une part des mécanismes de communication suffisamment rigides pour permettre des relations de cause à effet et, d'autre part, des mécanismes suffisamment souples pour permettre l'adaptation. Le recours à l'utilisation de mathématiques floues introduit l'entropie nécessaire au traitement par le système expert des connaissances recueillies auprès des experts. Le problème consiste à trouver le bon dosage entre connaissances déterministes et floues.

Chapitre 6

Mise en oeuvre et évaluation du système expert

Les chapitres 3, 4 et 5 ont essentiellement traité l'acquisition des connaissances nécessaires pour permettre la réalisation du système expert dont l'architecture est présentée au chapitre 2. Le but de ce chapitre est double. Il est, d'une part, d'effectuer une synthèse des connaissances à disposition dans le contexte de leur implantation dans un système expert et de discuter du choix de l'outil pour le développement du système expert. D'autre part, ce chapitre analyse les performances du système expert développé en traitant différents cas de charges. Les performances du système expert sont analysées sur la base des deux exigences fondamentales à satisfaire pour une méthode d'analyse de contingences en temps réel : la précision et la rapidité. Les performances du système expert sont comparées à celles obtenues en utilisant une approche classique basée sur la résolution d'un calcul de répartition de puissance pour chacune des contingences.

6.1. Structure de la base de connaissances

Cette section rassemble les différentes connaissances à disposition et présente l'organisation générale de la base de faits et de règles utilisée pour l'élaboration du prototype de système expert défini au chapitre 2.

6.1.1. Organisation de la connaissance

Le problème traité constitue principalement un problème de diagnostic bien qu'il peut également être considéré comme un problème de contrôle. Les problèmes de diagnostic nécessitent le choix d'une recommandation à partir de déductions effectuées sur la base d'observations. Il n'est pas possible de constituer un arbre de décision systématique parce que les règles contiennent une part de logique floue (fuzzy logic) et nécessitent d'autre part la connaissance de la situation actuelle du réseau électrique traité. Les problèmes de contrôle sont ceux pour lesquels le système expert doit observer les grandeurs du système et prendre une décision en fonction de l'état du système. La nature de la tâche est beaucoup plus proche d'un diagnostic dans le sens que le système génère des avertissements parmi un nombre limité de recommandations. De

manière schématique, le problème considéré peut être représenté de la manière suivante (figure 6.1) :

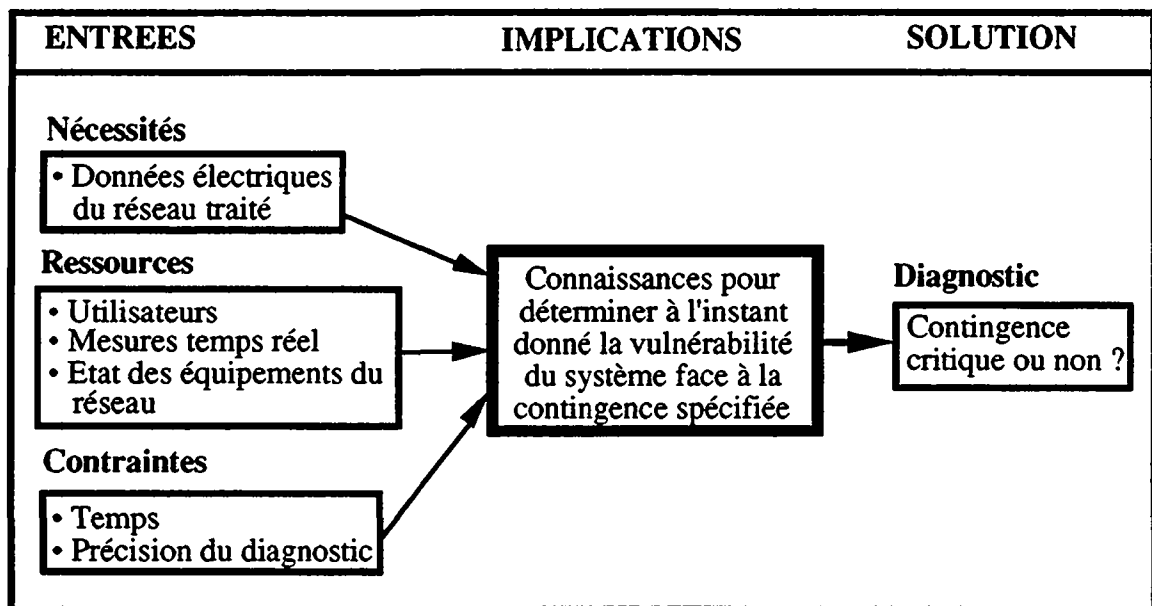


Figure 6.1: Structure schématique du problème à résoudre

Le travail de conception du système expert va porter essentiellement sur la structuration de la connaissance recueillie sous différentes formes. Ces connaissances diverses peuvent être regroupées en fonction du degré de pertinence contenu dans l'information apportée ou plus simplement en fonction de la dépendance de la connaissance vis-à-vis du problème en cours de traitement. Macroscopiquement, ces différentes formes de connaissance peuvent être représentées à l'aide de la figure 6.2.

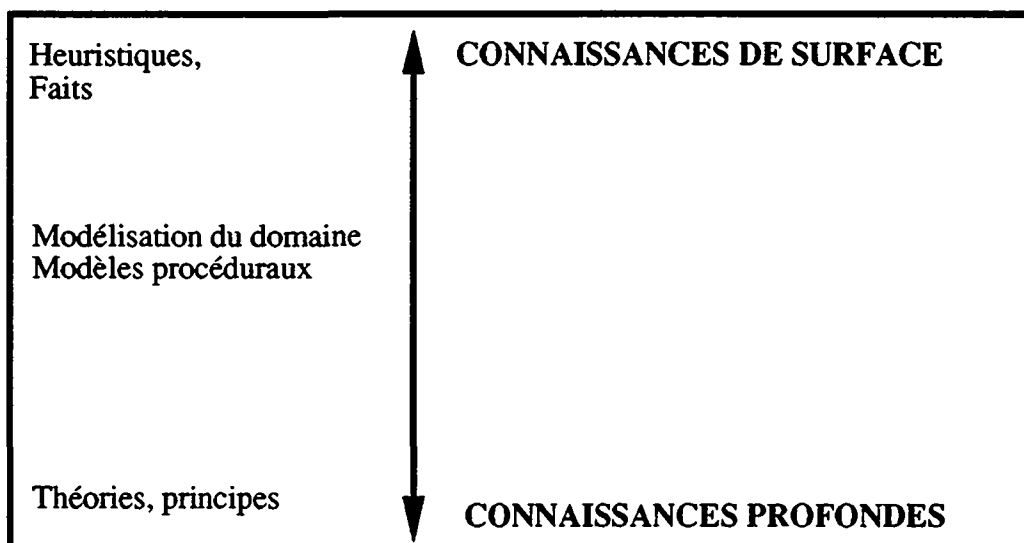


Figure 6.2 : Structure générale des connaissances

La connaissance contenue sous ses différentes formes fait l'objet d'une attention tout au long du développement du système expert et doit être reformulée constamment. La validation de

l'expertise introduite dans la base de connaissances est effectuée en analysant les résultats provenant du traitement de situations réelles par le système expert. Le processus de mise au point du système expert peut être illustré par la figure 6.3. Ce processus est tout à fait identique à n'importe quel développement entrepris par la pensée humaine.

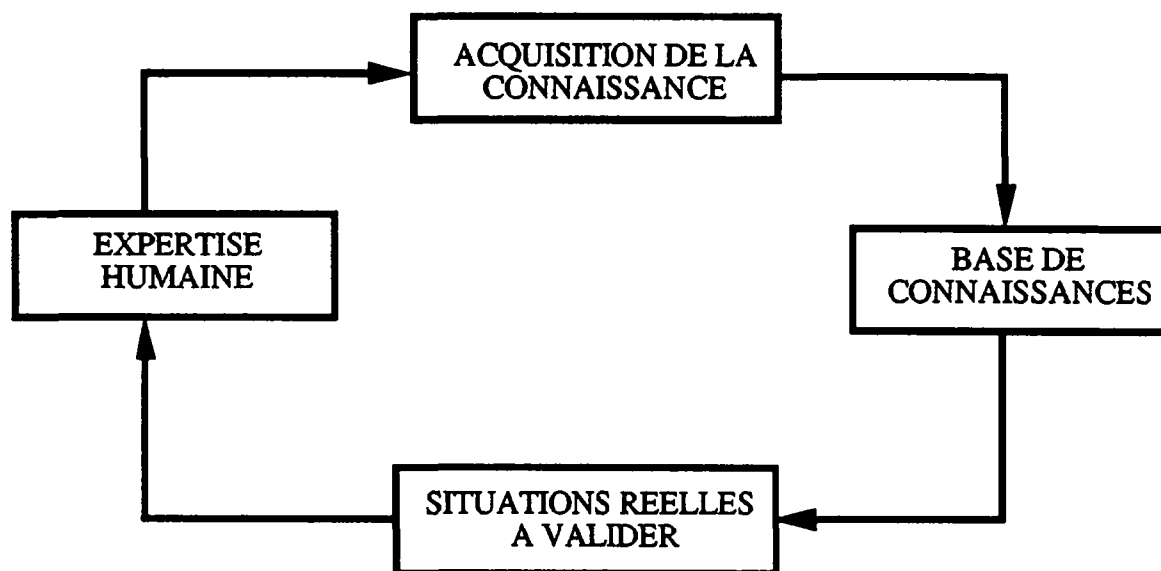


Figure 6.3 : Processus de mise au point d'un système expert

6.1.2. Structure de la base de faits

Une organisation appropriée des faits de la base de connaissances facilite la lecture et la modification de ceux-ci et permet également le parcours de cette connaissance de manière efficace. En considérant les différents modes de représentation décrits dans le chapitre 2, le choix s'est porté sur la structuration de la base de faits à l'aide d'objets.

La base de faits est constituée d'une part d'objets statiques propres au fonctionnement interne de la base de règles et d'autre part, de faits introduits dynamiquement au cours de l'inférence. Les premiers faits à être pris en considération sont introduits lors de la lecture du fichier de description électrique du réseau traité.

La base de faits comprend, après la lecture du fichier électrique, trois classes principales d'objets:

- Les noeuds
- Les lignes
- Les transformateurs

Les générateurs ne sont pas indiqués de manière explicite, mais sont pris en compte dans les attributs spécifiques aux noeuds. La figure 6.4 présente graphiquement chacune des classes d'appartenance des objets dynamiques avec leurs propriétés associées. D'autres classes d'objets sont introduites pour le fonctionnement interne des mécanismes d'inférences. Celles-ci ne seront pas présentées. Par exemple, pour chacune des contingences analysées, une structure dynamique

d'objets est créée pour permettre la mémorisation des principaux éléments de connaissances recueillis.

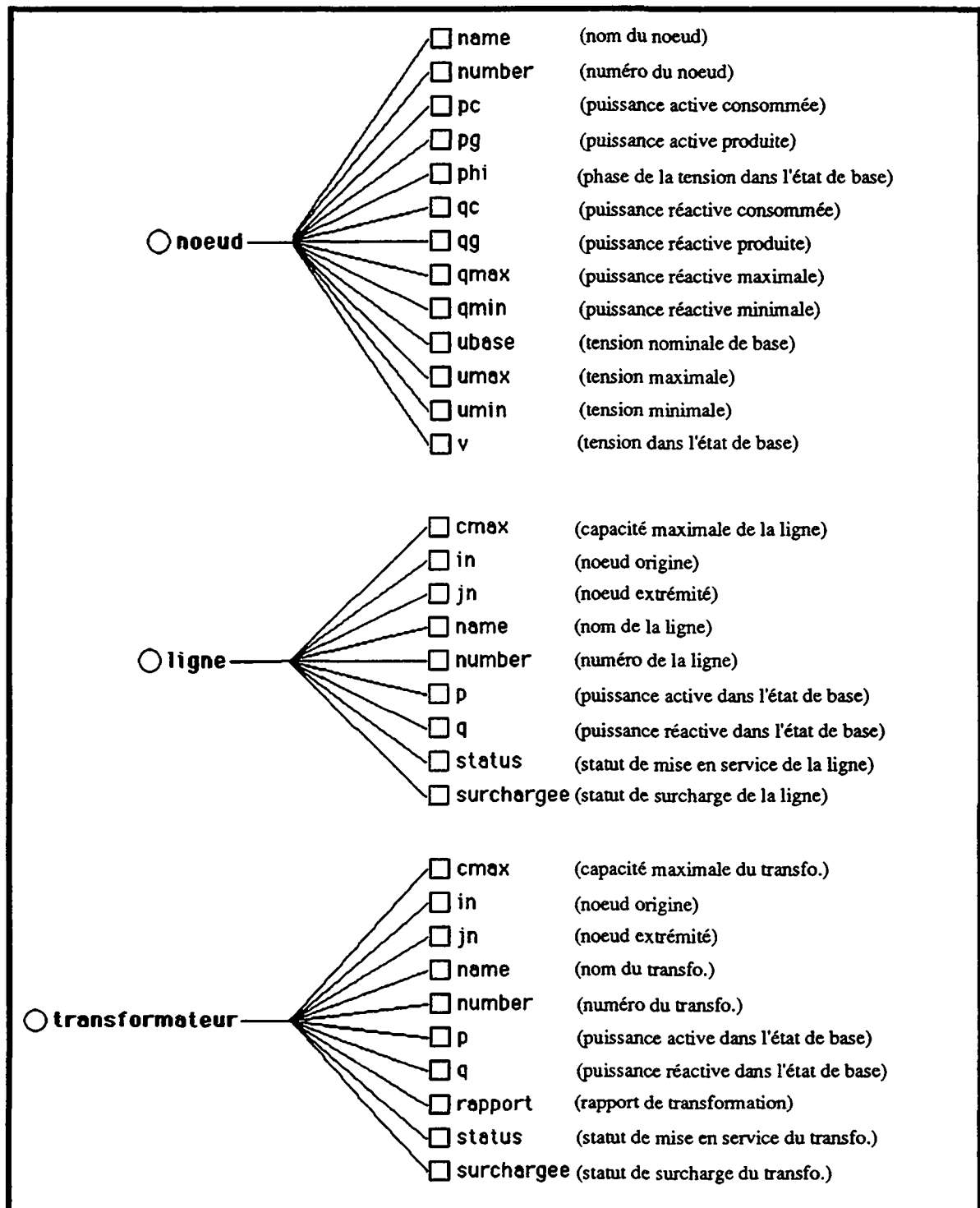


Figure 6.4 : Structure de la base de faits pour la description électrique

6.1.3. Structure de la base de règles

Les différentes règles de production introduites dans la base de connaissances peuvent se regrouper selon les divers modules qui constituent l'architecture du système expert. Les différentes règles se rapportent à l'une des six principales tâches du système expert.

- Tâche 1 : Règles propres à l'analyse des requêtes suggérées par l'utilisateur.
- Tâche 2 : Règles propres à l'analyse d'une contingence simple ou double.
- Tâche 3 : Règles propres à l'analyse d'une contingence de manière qualitative.
- Tâche 4 : Règles propres à l'analyse d'une contingence à l'aide d'une approche quantitative.
- Tâche 5 : Règles propres à l'établissement d'un diagnostic.
- Tâche 6 : Règles utilisées pour la présentation des résultats et des recommandations à l'opérateur.

Le propos des paragraphes suivants est de présenter les règles associées au fonctionnement général de chacune des tâches. La mise en oeuvre des différentes règles présentées nécessite la prise en considération d'heuristiques pour la résolution des conflits. Actuellement, le système comprend environ 150 règles explicites qui font appel à des procédures externes écrites en C ou à des bases de données pour compléter la quête de connaissances. La liste des règles présentées ci-dessous n'est pas exhaustive, mais elle vise uniquement à décrire de manière macroscopique les principales tâches. D'autre part, les règles énoncées ci-dessous imbriquent également les décisions et les investigations des différentes sources de connaissances décrites dans les chapitre 3, 4 et 5.

6.1.3.1. Règles propres à l'analyse des requêtes suggérées par l'utilisateur.

SI une demande d'analyse de contingence simple est suggérée, **ALORS** demander le nom de la branche à analyser et vérifier qu'elle existe.

SI une demande d'analyse systématique des contingences simples ou doubles est suggérée, **ALORS** extraire parmi les lignes et les transformateurs chacune des branches et procéder à son analyse.

SI une demande d'analyse systématique des contingences doubles est suggérée, **ALORS** extraire parmi l'ensemble des branches toutes les combinaisons de deux branches.

SI une demande d'initialisation est suggérée, **ALORS** créer la structure d'objets correspondante au fichier électrique.

6.1.3.2. Règles propres à l'analyse d'une contingence simple ou double

SI une demande de contingence simple ou double est suggérée et que la ou les branche(s) existent, **ALORS** déterminer si la contingence a déjà été analysée.

SI la contingence a déjà été analysée et le point de fonctionnement est différent et le réseau est connexe, **ALORS** détruire la structure d'objets propre à la contingence et procéder à son analyse.

SI la contingence a déjà été analysée et que le réseau n'est pas connexe, **ALORS** ne pas procéder à son analyse.

SI la contingence doit être analysée, **ALORS** créer dynamiquement une structure d'objets permettant de mémoriser les informations relatives à la contingence.

6.1.3.3. Règles propres à l'analyse d'une contingence de manière qualitative

SI le diagnostic de la contingence n'a pas été établi de manière quantitative, **ALORS** déterminer si elle existe dans la liste des contingences connues comme critiques (cf. chapitre 5).

SI la situation courante et le contexte dans lesquels la contingence est citée correspondent, **ALORS** la contingence est critique (cf. chapitre 5).

SI la contingence n'est pas connue comme critique, **ALORS** déterminer l'indice de performance associé à la contingence.

SI l'indice de performance est inférieur à un seuil, **ALORS** la contingence n'est pas critique (cf. chapitre 4).

6.1.3.4. Règles propres à l'analyse d'une contingence de manière quantitative

SI une contingence doit être analysée, **ALORS** déterminer une estimation de la charge des branches (cf. paragraphe 3.3).

SI il existe au moins une branche surchargée, **ALORS** la contingence est considérée comme critique.

SI la méthode ne permet pas de déterminer le statut de la contingence, **ALORS** calculer une répartition de puissance.

SI il n'est pas possible d'appliquer le principe de superposition pour l'analyse d'une contingence double à l'aide de la méthode, **ALORS** calculer une répartition de puissance.

SI la contingence est critique **ALORS** vérifier l'exactitude de ce diagnostic à l'aide des règles de l'approche présentée au paragraphe 3.5.

SI il est nécessaire de vérifier l'exactitude, **ALORS** déterminer la liste des zones auxquelles appartiennent les branches influencées.

SI pour une majorité de zones le réseau se comporte de manière semblable, **ALORS** le diagnostic critique est confirmé.

SI le diagnostic critique n'est pas confirmé, **ALORS** le statut de la contingence doit être considéré avec réserve.

6.1.3.5. Règles propre à l'établissement d'un diagnostic.

SI une répartition de puissance a été calculée, **ALORS** le diagnostic de la contingence est celui obtenu avec cette méthode.

SI le statut de la contingence a été déterminé de manière qualitative et quantitative, **ALORS** le statut obtenu de manière quantitative doit être considéré en priorité.

SI le diagnostic de la contingence diffère pour les différentes approches examinées, **ALORS** le statut de la contingence doit être considéré avec réserve.

6.1.3.6. Règles utilisées pour la présentation des résultats et des recommandations à l'opérateur.

SI une analyse systématique des contingences a été effectuée, **ALORS** présenter les contingences critiques en les regroupant par niveau de tension.

SI une estimation de la charge des branches est demandée (cf chapitre 3) **ALORS** classer les contingences dans l'ordre décroissant des surcharges observées.

SI la contingence analysée a été déterminée comme critique sur la base des connaissances décrites au chapitre 5, **ALORS** indiquer les recommandations associées au cas où elles existent.

SI la contingence analysée a été déterminée comme critique, **ALORS** déterminer la possibilité de supprimer la ou les surcharges à l'aide d'une mise hors service de une ou plusieurs branches (cf. 3.3.1).

6.2. Implantation du système expert

Le développement d'un système expert nécessite des outils adéquats. Une façon de procéder consiste à programmer un système expert à l'aide d'un langage standard. Plutôt que d'écrire un nouveau moteur d'inférences avec son environnement d'exploitation, il convient d'utiliser des outils de développement qui, d'une part, déchargent le concepteur de l'écriture des mécanismes d'inférence et, d'autre part, facilite la mise en oeuvre du système expert. Ce paragraphe a pour objectif de décrire l'outil choisi pour le développement et de présenter l'intégration de cet outil au sein d'un environnement mixte comprenant du code écrit en Fortran et en C.

6.2.1. Choix d'un outil système expert

Il faut clairement distinguer le système expert, c'est-à-dire la forme sous laquelle il sera mis à disposition de l'utilisateur final, et l'ensemble des outils mis en oeuvre pour le développer.

Le système expert est dédié à une application déterminée, par exemple l'analyse de sécurité en régime permanent d'un réseau électrique. Ce système est considéré comme fermé, car son évolution est garantie uniquement dans le cadre de l'application pour laquelle il est destiné. A l'opposé, les outils génériques de systèmes experts sont utilisés pour le développement d'applications et sont par conséquent considérés comme des systèmes ouverts. Actuellement, il existe sur le marché un grand nombre d'outils plus ou moins sophistiqués pour le développement de systèmes experts. Ces différents outils peuvent être regroupés en deux classes principales :

- Les outils de base
- Les générateurs d'applications (shells)

Les outils de base comprennent non seulement les langages procéduraux classiques tels que le langage C, mais également des langages de programmation développés pour les besoins de l'intelligence artificielle (LISP, Prolog, OPS83). Ces outils de base offrent généralement des mécanismes d'inférence élémentaires et nécessitent le développement d'outils d'inférences complémentaires de la part de l'utilisateur.

Les générateurs d'applications sont des outils qui simplifient considérablement le travail de développement des systèmes experts. Ils ne nécessitent pas l'écriture du moteur d'inférence et les différents outils nécessaires pour son exploitation. En contrepartie, ils ne permettent pas d'assurer une vitesse d'exécution rapide en comparaison de celle offerte par un langage classique de programmation comme le langage C. Ils fournissent cependant la possibilité de développer de nouveaux outils en faisant appel à un langage comme le C. Ils permettent l'acquisition et la représentation de la connaissance propre au domaine. Ces générateurs de systèmes experts comprennent des éditeurs pour introduire et modifier la connaissance, des facilités d'entrée-sortie pour interfacer le système avec d'autres langages ou produits commerciaux et, finalement, des mécanismes d'inférence sophistiqués comme ceux décrits au paragraphe 2.4.

Les principales caractéristiques des outils de développement de systèmes experts sont les suivantes :

- Méthodes de représentation de connaissances et la complexité des mécanismes d'inférence disponibles pour exploiter la base de connaissances.
- Portabilité de l'application sur différentes plates-formes et coût de l'outil.
- Qualité de l'interface pour la conception du système expert.

Le propos n'est pas d'effectuer un inventaire des outils de développement pour les systèmes experts. Cependant, une enquête récente de la CIGRE [Ger89] recense les différents systèmes experts appliqués aux problèmes des réseaux électriques en cours de développement ou en exploitation. La figure ci-dessous 6.5 illustre la répartition des outils de base et des générateurs d'applications utilisés pour le développement des systèmes experts recensés.

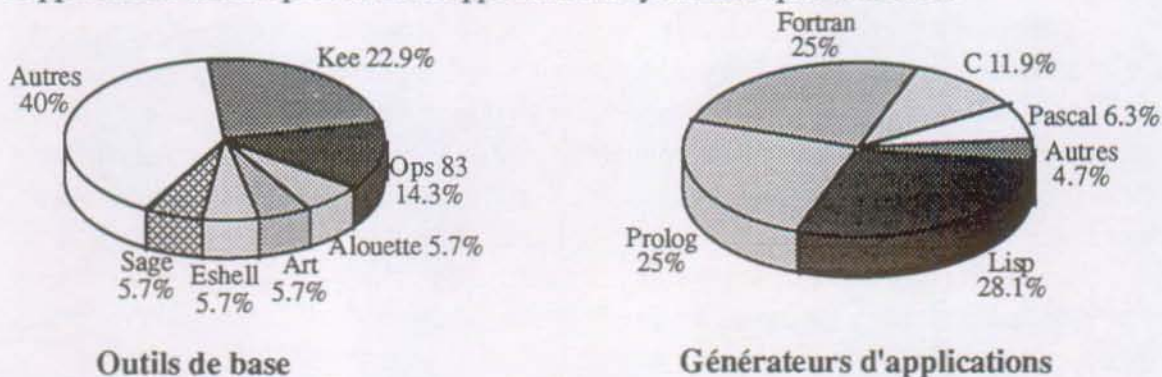


Figure 6.5 : Outils de base et générateurs d'applications utilisés pour le développement de systèmes experts

De nombreux facteurs peuvent être pris en considération pour effectuer le choix d'un générateur d'applications. Le choix d'un outil va conditionner la mise en oeuvre des connaissances de par la nature des mécanismes d'inférence à disposition, mais également de par la disponibilité des facilités pour l'organisation de celles-ci. Une structuration appropriée des connaissances au générateur d'applications utilisé permet d'assurer un parcours efficace et rapide de la base de connaissances. En ce qui concerne l'application des systèmes experts au domaine de l'analyse de sécurité en régime permanent, le choix a été effectué en insistant sur la disponibilité de mécanismes de représentation et d'inférences sophistiqués. De par la nature hybride du système expert, il est également nécessaire de disposer de facilités d'entrée-sortie. En analysant les différents produits offerts sur le marché, en tenant également compte de la disponibilité de stations de travail Unix HP-Apollo, le choix s'est porté sur l'utilisation de Nexpert Object de la société Neuron Data.

Quelque soit le choix de l'outil de développement des systèmes experts, il faut être conscient qu'il sera toujours nécessaire de résoudre des problèmes de conceptualisation, d'adaptation de l'outil, de formalisation de la base de connaissances,...

6.2.2. Description de Nexpert Object

Nexpert représente le contexte du projet à résoudre en termes d'objets, à l'aide de classes qui constituent une généralisation des objets. Les objets peuvent également comprendre des sous-objets. Les objets et les classes sont décrits à l'aide de propriétés. Il faut distinguer la propriété de l'espace mémoire où la valeur de cette propriété est mémorisée. L'espace mémoire est appelé "slot".

Le comportement des slots est décrit à l'aide de "Meta-Slot". Ils communiquent les informations nécessaires pour déterminer la valeur d'un slot, ce qu'il faut faire si cette valeur change, et la manière de demander à l'opérateur l'information s'il n'est pas capable de la déterminer par lui-même. Les mécanismes d'héritages des valeurs des slots peuvent être également spécifiés. Ils permettent de définir une valeur ou un comportement au niveau d'un parent. Tous les objets ou classes qui se trouvent rattachés au parent peuvent hériter de celui-ci. Nexpert permet d'hériter par défaut d'une classe à un objet. Il est également possible de spécifier l'inverse, c'est-à-dire d'un objet à une classe. Un objet peut hériter de parents multiples. Les conflits sont gérés à l'aide de priorités spécifiées pour chacun des parents. De manière générale, un objet ou une classe peut hériter des propriétés, des valeurs, des méthodes de détermination d'une valeur ou d'une méthode pour déterminer le comportement à adopter lorsque la propriété change de valeur.

Des objets dynamiques et des liens dynamiques entre objets et classes permettent de représenter les modifications qui apparaissent en cours de vérification d'une hypothèse. De la même manière, l'héritage est dynamique. Il est possible pour un objet d'hériter d'un parent à un instant et d'un autre parent à l'instant suivant. De manière générale, l'introduction d'objets dynamiques permet au système d'être plus flexible, de par la possibilité de créer et détruire des objets lorsqu'il est nécessaire.

Les règles contiennent les heuristiques et relations à l'intérieur de la base de connaissances. Elles s'appliquent au problème à résoudre sur la base de la description de celui-ci à l'aide d'objets. Les règles sont symétriques, c'est-à-dire qu'elles peuvent être déclenchées aussi bien en chaînage avant ou arrière. Si toutes les conditions de la partie gauche de la règle sont vérifiées, alors l'hypothèse est vraie et toutes les actions décrites dans la partie droite de la règle sont exécutées. Il suffit d'une seule condition qui ne puisse être vérifiée pour que l'hypothèse soit fausse et que les actions de la partie droite de la règle ne soient pas exécutées. Une condition qui ne peut être validée, c'est-à-dire qu'elle n'est ni fausse ni vraie, est prise en considération en associant à l'hypothèse un statut non déterminé.

Nexpert est basé sur un mécanisme d'agenda. Cela signifie qu'il procède à l'évaluation des hypothèses selon la manière dont elles ont été déclenchées. Ce n'est pas simplement un mécanisme basé sur un algorithme FIFO ou LIFO. L'agenda de Nexpert gère les priorités des hypothèses et non pas les priorités des règles. A chaque hypothèse est attribué une priorité sur la base du mode de déclenchement. La priorité la plus élevée est attribuée aux hypothèses déclenchées par chaînage arrière. L'agenda comprend cinq catégories d'hypothèses et à l'intérieur de chacune des catégories, la priorité d'inférence spécifiée dans la règle détermine l'hypothèse qui sera évaluée en premier.

Finalement, l'idée principale à retenir des mécanismes d'inférence de Nexpert est la notion de temporaire. Nexpert entreprend des actions sur la base de l'état courant de la mémoire de travail. Si un slot doit déterminer sa valeur par héritage, il le fait sur la base du mécanisme spécifié et au moment où la valeur du slot doit être connue. Il ne prend pas en compte les valeurs précédentes et futures des parents qui contribuent à son héritage. De plus, lorsqu'un slot doit déterminer sa valeur, Nexpert examine toutes les parties conditions des règles qui nécessitent la connaissance de la valeur de ce slot et il place les différentes hypothèses dont la condition est vraie dans l'agenda. Il ne tient pas compte de l'appartenance des hypothèses à une même base de connaissances. De cette manière, il est possible d'enrichir la connaissance acquise pour le problème en cours d'évaluation par l'évaluation des liens entre les différentes sources de connaissances.

Nexpert offre à la base un environnement de développement comprenant un interface utilisateur convivial. De nombreux éditeurs permettent d'introduire des objets, des règles tout en vérifiant la syntaxe. D'autres outils sont à disposition pour structurer la base de connaissances et représenter graphiquement les relations entre les différentes règles ou objets. Nexpert comprend également de nombreuses facilités d'entrée-sortie, plus particulièrement des interfaces avec les bases de données les plus courantes sur le marché et toutes les procédures nécessaires pour accéder au noyau de Nexpert à partir du langage C. Cette possibilité a d'ailleurs été abondamment utilisée pour le développement du prototype de système expert. D'autres outils sont à disposition de l'utilisateur pour la mise au point du système expert en offrant la possibilité d'observer le fonctionnement pas à pas du système en cours de développement tout en ayant simultanément accès au contenu courant de la mémoire de travail.

6.2.3. Interface entre Nexpert et le monde extérieur

Le choix de Nexpert Object a été effectué, d'une part, à cause de la diversité des mécanismes d'inférence et des modes de représentation des connaissances. D'autre part, le choix de Nexpert a été également effectué pour sa capacité de communication avec le monde extérieur. Il est très facile de l'interfacer avec la plupart des bases de données commercialisées et, surtout, avec des langages classiques de programmation comme le Fortran. En effet, Nexpert est en réalité une bibliothèque de procédures écrites en C comprenant entre autres un interface graphique.

Un langage ou un outil spécialisé pour le développement d'un système expert n'est pas approprié pour effectuer des opérations en virgule flottante. Il est possible de les effectuer mais les performances seront bien inférieures à celles que l'on peut obtenir avec un code écrit dans un langage de programmation traditionnel. Par exemple, les connaissances acquises à partir de l'analyse systématique des contingences simples (cf. chapitre 3) ont été mises en oeuvre en utilisant le langage C. De par la nature du problème à résoudre, il est également nécessaire de pouvoir disposer d'un outil de calcul pour la répartition de puissance. C'est un programme écrit en Fortran au sein du laboratoire qui a été choisi. Pour les différentes raisons énoncées ci-dessus, le système expert développé communique avec des procédures écrites en Fortran et en C, externes à Nexpert Object.

La description du réseau électrique est réalisée à l'aide d'une structure standard sous la forme d'un fichier. Cette description est chargée en mémoire lors de la phase d'initialisation du système expert. Ce sont essentiellement des données électriques qui doivent être accessibles par Nexpert, mais également par l'outil de calcul de répartition de puissance écrit en Fortran. De manière à limiter le risque d'erreur, les informations contenues dans le fichier de description du réseau électrique ne sont pas dupliquées, mais stockées en mémoire de manière à être communes à Nexpert et à l'ensemble des procédures écrites en Fortran ou en C.

D'un point de vue fonctionnel, la structure du prototype développé peut être décrit à l'aide de la figure 6.6 ci-dessous :

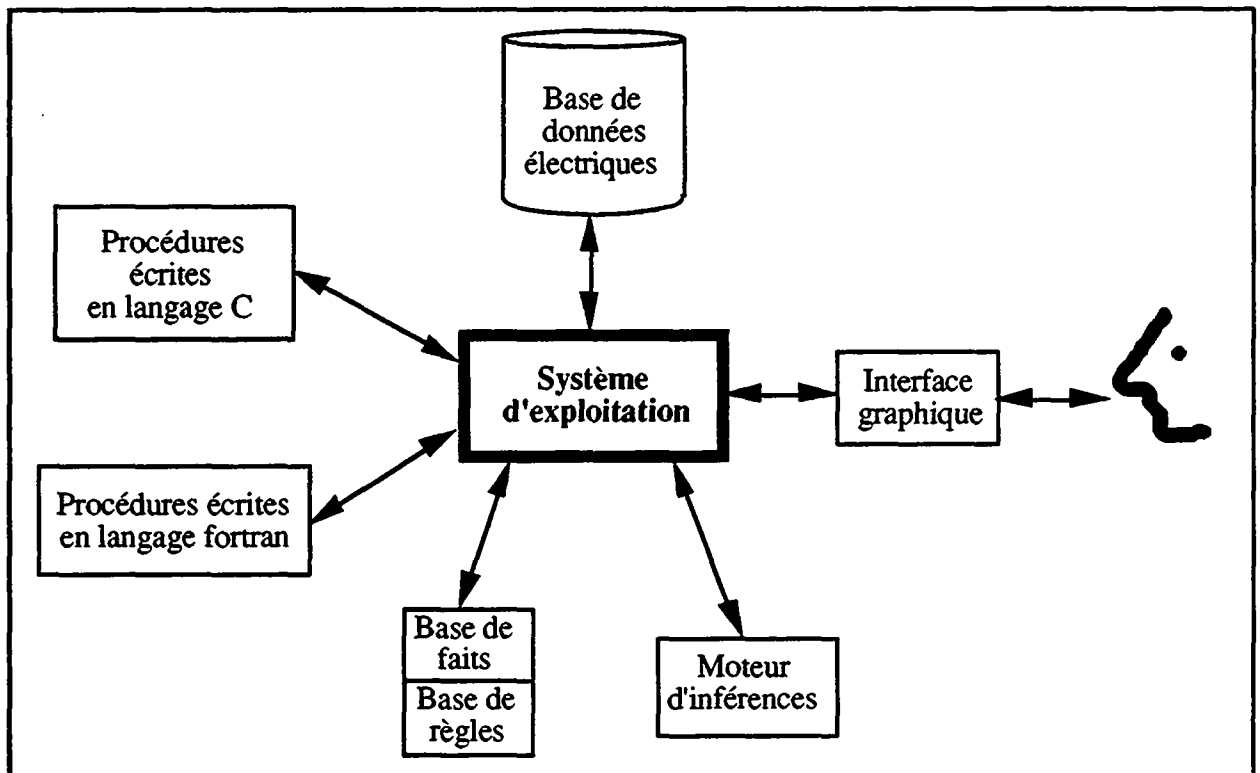


Figure 6.6 : Système expert et son environnement

6.3. Validation et évaluation des performances du système expert

Il y a principalement deux aspects sous-jacents à l'évaluation des performances d'un système expert. Le premier est de déterminer si le système expert est capable de résoudre le problème. Le deuxième aspect consiste à évaluer la possibilité de comparer les résultats obtenus avec une méthode capable de résoudre le même problème. Face à ces deux principaux aspects de l'évaluation des capacités du système expert, différents problèmes se posent. D'une part, le choix des critères d'évaluation qui permettent de valider les objectifs à atteindre selon le cahier des charges fixé pour le système expert à développer; d'autre part, le choix du mode d'évaluation des résultats du système expert. Finalement, le choix de situations réelles doit permettre de valider et évaluer les performances du système expert développé. Ce sont ces différents aspects qui sont discutés dans ce paragraphe.

6.3.1. Choix des objectifs de validation

De manière générale, la phase de validation doit vérifier l'adéquation du système expert développé à ses spécifications. La difficulté réside dans le choix d'un critère objectif pour estimer la qualité d'un résultat proposé par le système expert. D'une part, le système expert manipule des connaissances inexactes et imprécises et d'autre part, il fait appel à des mécanismes de raisonnement non déterministes. Le système expert peut par conséquent proposer une solution qui n'est pas nécessairement optimale pour le problème considéré.

Il convient de déterminer l'objet de la validation. D'une part, il y a la base de connaissances et d'autre part, il y a l'outil utilisé pour exploiter la base de connaissances. Une séparation arbitraire de ces deux objets n'est pas imaginable pour effectuer une validation du système expert développé. L'un et l'autre s'influencent mutuellement. En phase d'exploitation, il est également nécessaire de prendre en compte l'interaction de l'opérateur qui dialogue avec le système expert.

Le choix des objectifs de validation est dicté par les exigences à remplir, c'est-à-dire la précision et la rapidité d'un diagnostic pour une contingence. La précision et l'efficacité du diagnostic peuvent être validés par le choix de scénarios ou situations pertinentes proposées par les exploitants. Cette tâche doit être effectuée en proposant un nombre de scénarios variés. Cependant, il n'est pas facile de valider l'intégrité et l'exhaustivité de la base de connaissances à partir de l'analyse des résultats de situations diverses.

Différents facteurs sont à prendre en considération pour l'analyse de la vitesse d'exécution d'un système expert, tels le logiciel utilisé pour le développement du système expert, l'équipement utilisé pour faire fonctionner le logiciel et, bien entendu, la qualité du programme. Dans le cadre de cette thèse, il n'était pas possible de tester l'implantation de la base de connaissances à l'aide de différents outils de programmation. Il faut cependant être conscient qu'une amélioration ou une diminution des performances est possible en utilisant un autre outil de développement. Les performances dépendent également de la mise en oeuvre de la connaissance à l'intérieur de l'outil utilisé. De manière idéale, il convient d'identifier pour chacune des tâches du système expert le temps moyen pour effectuer la tâche, afin d'indiquer les connaissances à améliorer ou à reformuler. Cependant, le temps mis en oeuvre pour chacune des tâches est fortement dépendant de la nature du problème à résoudre et il est par conséquent difficile de tirer des conclusions générales. L'analyse de la rapidité du système expert développé se concentrera essentiellement sur la comparaison des temps de calcul entre une approche classique et l'approche système expert.

6.3.2. Choix du mode de validation

Le choix des critères de validation soulève la nécessité de disposer d'un second outil. Cet outil peut être plus généralement un expert ou tout autre outil de calcul. Pour un scénario ou une situation de charge du réseau, l'outil résolvant le problème le plus rapidement et avec la plus grande précision sera considéré comme le meilleur pour la situation analysée.

L'outil utilisé pour la comparaison des résultats est un logiciel de calcul de répartition de puissance développé par le Laboratoire de Réseaux Electriques en Fortran. La résolution est basée sur le découplage de l'actif et du réactif (cf. section 3.1.2). L'utilisation de cet outil permet de comparer les résultats obtenus avec une approche système expert et, par la même occasion, de comparer les résultats obtenus avec l'approche traditionnelle utilisée pour l'analyse de sécurité, c'est-à-dire un calcul de répartition de puissance sans connaissances spécifiques pour la contingence analysée.

6.3.3. Précision des résultats

La qualité du diagnostic et plus particulièrement l'estimation des résultats de la méthode sont basées sur l'analyse de la comparaison des résultats obtenus avec un calcul de répartition de puissance. La précision du diagnostic est observée en définissant les erreurs de première et de seconde espèce.

De manière générale, l'erreur de première espèce consiste à rejeter une hypothèse alors qu'elle est vraie. L'erreur de seconde espèce consiste à accepter une hypothèse alors qu'elle est fausse. Ces deux erreurs peuvent être définies pour le problème considéré sur la base des mesures définies pour l'évaluation de l'efficacité des méthodes de classement de contingences (cf. 4.2.2.). Les taux de précision de filtrage et de fausses alarmes peuvent être rattachés à la définition des erreurs de première et de seconde espèce.

L'erreur de première espèce consiste à rejeter à tort l'hypothèse "la contingence n'est pas active" et par conséquent de la considérer comme critique. Elle correspond au taux de fausses alarmes.

$$\text{Erreur de première espèce} = T_{FA} \quad (6.1)$$

L'erreur de seconde espèce consiste à accepter à tort l'hypothèse "la contingence n'est pas active" et par conséquent de la considérer comme non critique. Elle correspond à 1-taux de précision de filtrage.

$$\text{Erreur de deuxième espèce} = 1 - T_{PF} \quad (6.2)$$

La qualité de l'approche proposée sera jugée sur sa capacité à obtenir une erreur de première et de seconde espèce nulle, c'est-à-dire à déterminer toutes les contingences actives sans en considérer d'autres à tort.

Il est cependant nécessaire de pouvoir apprécier l'ampleur de l'erreur commise pour les diagnostics incorrects. Pour chaque contingence dont le diagnostic est erroné, il est possible de définir les mesures suivantes :

Mesure pour l'erreur de première espèce :

$$M1_k = \text{MAX}(C_{ik} - 100) \forall i \text{ tel que } C_{ik} > 100, i \in [1..N_{\text{bran}}] \quad (6.3)$$

$M1_k$: Mesure d'erreur de première espèce pour la contingence k en pourcent

k : Numéro de la contingence

C_{ik} : Charge relative de la branche i pour la contingence k en pourcent (valeur évaluée à l'aide de l'approche du chapitre 3)

N_{bran} : Nombre de branches du réseau

Mesure pour l'erreur de deuxième espèce :

$$M2_k = \text{MIN}(100 - C_{ik}) \forall i \in [1..N_{\text{bran}}] \quad (6.4)$$

$M2_k$: Mesure d'erreur de deuxième espèce pour la contingence k en pourcent

Ces deux mesures doivent permettre d'estimer le degré d'erreur associé au diagnostic.

6.3.4. Rapidité du système expert

Le temps utilisé pour le raisonnement du système expert constitue le deuxième facteur pris en considération pour évaluer les performances du système expert. L'évaluation du temps nécessaire pour émettre un diagnostic soulève le problème du fonctionnement en temps réel du système. Un système en temps réel comprend deux processus branchés l'un sur l'autre et qui ont chacun leurs propres règles de fonctionnement. D'une part, il y a le processus physique qui est le réseau. D'autre part, il y a le système expert dont le fonctionnement dépend des mesures qu'il obtient du système auquel il est relié. Un système temps réel est souvent assimilé à la recherche de performances, mais en réalité le cycle de fonctionnement peut être de l'ordre de minutes ou d'heures. Comme en informatique classique, le fonctionnement en temps réel est défini en référence au temps de réponse du système. La condition nécessaire pour que le système expert puisse fonctionner en temps réel est que la durée d'exécution de l'analyse des contingences soit inférieure à la constante de temps du réseau. Généralement, cette constante de temps est de l'ordre de 15 à 20 minutes.

L'introduction de la notion de temps réel dans un système à base de connaissances soulève le problème essentiel de la maîtrise du temps. La maîtrise du temps de déroulement du programme, est associée à la garantie que, dans le cas le plus défavorable, le temps nécessaire pour effectuer un diagnostic sera inférieur à la constante de temps du réseau. Cette exigence est en désaccord avec le fonctionnement d'un système expert où le processus de recherche de solution n'est pas figé.

Pour l'évaluation de la rapidité du système expert développé, l'effort se concentrera principalement sur la comparaison du temps de calcul nécessaire pour effectuer une analyse des contingences simples et doubles avec un calcul de répartition de puissance. De manière à s'affranchir du type de matériel utilisé pour faire fonctionner le prototype développé, les comparaisons sont effectuées en valeur relative.

6.3.5. Situations utilisées pour valider le système expert

Le prototype de système expert développé a été validé en effectuant des analyses de sécurité pour le réseau suisse à haute tension 380KV/220KV et la partie ouest 125KV du réseau. Quatre différentes situations de charge ont été considérées. Une situation d'été heure pleine (ehp) et trois situations d'hiver dont une en période de faible charge (hhc) et les deux autres en période de forte charge (hhp et thp), dont une correspond à un hiver très froid (thp). Les productions fixes, les charges, les transits sur les lignes d'interconnection et les tensions aux noeuds sont proches de la réalité pour chacune des quatre situations considérées. De manière idéale, il aurait été préférable de disposer des données relatives à l'évolution du plan de production et des charges pour une journée en incluant l'ensemble du réseau électrique 150KV et 125KV.

6.3.5.1. Description du réseau

Comme le montre les figures 5.1 et 5.2, le réseau suisse à haute tension est interconnecté avec la France, l'Italie, l'Autriche et l'Allemagne par un certain nombre de lignes d'interconnexion. La modélisation du réseau suisse considéré comprend :

- 26 noeuds 380KV et 47 lignes.
- 43 noeuds 220KV et 67 lignes.
- 38 noeuds 125KV et 53 lignes.
- 10 transformateurs 380KV/220KV.
- 16 transformateurs 220KV/125KV.

Le réseau extérieur à la Suisse comprend :

- 5 noeuds 220KV.
- 48 noeuds 380KV et 72 lignes.

Soit au total 160 noeuds et 265 branches. L'annexe C propose une représentation graphique du réseau en considérant les trois niveaux de tension séparément.

Le tableau 6.1 indique les quatre branches les plus chargées pour chacune des situations de charge considérées. Il comprend également l'indication de la charge active et réactive. La première valeur indique la charge pour les consommateurs qui se trouvent en Suisse et la deuxième valeur indique la charge totale du réseau traité.

Tableau 6.1 : Principales caractéristiques de chacune des situations de charge considérée

Situation	Charge active en [MW]	Charge réactive en [MVar]	Etat initial du réseau
été heure pleine (ehp)	3450 / 16512	1212 / 4885	Bus147 - Bus115 : 66.9 % Bus374 - Bus373 : 59.0 % Bus330 - Bus230 : 57.2 % Bus113 - Bus145 : 56.3 %
hiver heure creuse (hhc)	4835 / 19326	1645 / 6097	Bus31 - Bus311 : 81.2 % Bus335 - Bus336: 76.0 % Bus16 - Bus15 : 71.1 % Bus315 - Bus215 : 70.6 %
hiver heure pleine (hhp)	6492 / 24021	2410 / 6486	Bus349 - Bus365 : 90.4 % Bus16 - Bus15 : 87.4 % Bus31 - Bus311 : 87.1 % Bus236 - Bus235 : 85.5 %
hiver très froid heure pleine (thp)	6795 / 24820	2529 / 7410	Bus16 - Bus15 : 95.8 % Bus31 - Bus311 : 95.4 % Bus349 - Bus365: 94.0 % Bus236 - Bus235 : 93.1 %

6.4. Validation et évaluation du système expert pour l'analyse de sécurité N-1

Les quatre situations présentées au paragraphe 6.3.5 ont été considérées pour effectuer une analyse de sécurité N-1. Un tableau d'influence a été constitué pour chacune des quatre situations de base selon l'approche proposée au paragraphe 3.2.1. Le tableau 6.3 présente les résultats de l'analyse de sécurité N-1 pour chacune des quatre situations, lorsque la charge active et réactive a été augmentée de manière aléatoire de 10 % et respectivement de 5% pour chacun des noeuds du réseau. Le tableau 6.5 contient les résultats de l'analyse de sécurité N-1 lorsque la charge active et réactive a été diminuée de manière aléatoire de 10 % et respectivement de 5% pour chacun des noeuds du réseau. Les tableaux 6.2 et 6.4 fournissent des indications générales pour chacune des quatre situations considérées. Ils contiennent les quatre branches les plus chargées pour chacun des points de fonctionnement considérés.

La rubrique "Nombre états non connexes" indique le nombre de contingences simples qui conduisent à un état du réseau non connexe. La rubrique "Nombre états non identifiés" se réfère au nombre de contingences simples qui conduisent à des situations où le calcul de répartition de puissance ne converge pas. Les contingences qui conduisent à des états du réseau non connexes ou non identifiés ne sont pas pris en considération pour valider et évaluer les performances du système expert pour la situation de charge analysée. Seules les contingences actives et non actives sont considérées pour valider et évaluer le système expert.

Les connaissances considérées comprennent les règles définies au chapitre 3. L'approche basée sur l'application des règles recueillies auprès des exploitants (cf. chapitre 5) n'a pas été prise en

considération, car les règles à disposition concernent essentiellement une partie du réseau 132KV pour lesquelles les données de charge et de production à disposition ne sont pas cohérentes avec les autres données. L'approche basée sur l'utilisation des méthodes de classement de contingences (cf. chapitre 4) n'a pas été prise en considération. Les critères d'évaluation définis au paragraphe 6.3.3 sont indiqués pour chacune des situations de charge analysées. L'application de l'approche décrite au paragraphe 3.5 indique les contingences pour lesquelles il est nécessaire de procéder à un calcul de répartition de puissance.

Les tableaux 6.3 et 6.5 indiquent le nombre de calculs de répartition de puissance à effectuer et le nombre de contingences actives qui correspond aux cas où il n'est pas possible d'appliquer le principe de superposition. Ils contiennent également les temps obtenus pour une analyse de sécurité N-1 en utilisant les approches suivantes :

Approche A : Utilisation des connaissances décrites au paragraphe 3.3, c'est-à-dire l'estimation de la charge des branches suite à une contingence.

Approche B : Utilisation des connaissances décrites dans l'approche des paragraphes 3.3 et 3.5.

Approche C: Analyse de sécurité basée uniquement sur l'utilisation d'un calcul de répartition de puissance.

Pour les approches A et B, le temps en pourcent par rapport à l'approche C est indiqué entre parenthèses.

Tableau 6.2 : Indications générales pour chacune des quatre situations considérées avec une augmentation aléatoire de charge de 10% (actif) / 5% (réactif)

Situation	Etat du réseau Branches les plus chargées
été heure pleine	Bus147 - Bus115 : 70.7 %
	Bus374 - Bus373 : 61.3 %
	Bus113 - Bus145 : 59.6 %
	Bus16 - Bus15 : 59.2 %
hiver heure creuse	Bus335 - Bus336 : 81.3 %
	Bus315 - Bus215 : 78.1 %
	Bus317 - Bus318 : 76.8 % Bus31 - Bus311 : 75.7 %
hiver heure pleine	Bus16 - Bus15 : 95.8 %
	Bus31 - Bus311 : 95.4 %
	Bus349 - Bus365 : 94.0 % Bus236 - Bus235 : 93.1 %
hiver très froid heure pleine	Bus16 - Bus15 : 95.2 %
	Bus31 - Bus311 : 92.6 %
	Bus364 - Bus361 : 92.3 % Bus349 - Bus365 : 91.2 %

Tableau 6.3: Résultats de l'analyse de sécurité N-1 pour chacune des quatre situations considérées avec une augmentation aléatoire de charge de 10% / 5%.

Point de fonctionnement	été heure pleine	hiver heure creuse	hiver heure pleine	hiver très froid heure pleine
Nombre de contingences analysées	265	265	265	265
Nombre états non connexes	24	24	24	24
Nombre états non identifiés	24	16	28	35
Nombre de contingences actives	2	8	46	37
Nombre de contingences non actives	215	217	167	169
Nombre de fausses alarmes	0	0	4	3
Erreur 1ère espèce [%]	0	0	2.4	1.8
M1 _k [%]	-	-	1	4
Nombre de contingences critiques non détectées	0	0	0	3
Erreur 2ème espèce [%]	0	0	0	8.1
M2 _k [%]	-	-	-	4
Nombre de calculs de répartition	0	1	2	2
Nombre de contingences actives	-	1	2	2
Temps CPU [sec.]				
Approche A	204.8 (18.3%)	206.4 (18.3%)	203.7 (15.1%)	200.9 (16%)
Approche B	221.5 (19.8%)	239.4 (21.2%)	334.3 (24.8%)	302.9 (24.2%)
Approche C	1117.1	1130.7	1349.2	1253.7

Tableau 6.4 : Indications générales pour chacune des quatre situations considérées avec une diminution aléatoire de charge de 10% (actif) / 5% (réactif)

Situation	Etat du réseau	
	Branches les plus chargées	
été heure pleine	Bus147 - Bus115 : 62.9 %	
	Bus374 - Bus373 : 56.7 %	
	Bus330 - Bus230 : 55.2 %	
	Bus236 - Bus235 : 53.6 %	
hiver heure creuse	Bus31 - Bus311 : 86.8 %	
	Bus335 - Bus336 : 70.8 %	
	Bus16 - Bus15 : 70.2 %	
	Bus326 - Bus226 : 67.2 %	
hiver heure pleine	Bus349 - Bus365 : 87.1 %	
	Bus16 - Bus15 : 81.1 %	
	Bus364 - Bus361 : 80.1 %	
	Bus31 - Bus311 : 79.1 %	
hiver très froid heure pleine	Bus349 - Bus365 : 81.7 %	
	Bus16 - Bus15 : 80.2 %	
	Bus364 - Bus361 : 76.3 %	
	Bus351 - Bus355 : 70.3 %	

Tableau 6.5 : Résultats de l'analyse de sécurité N-1 pour chacune des quatre situations considérées avec une diminution aléatoire de charge de 10% / 5%.

Point de fonctionnement	été heure pleine	hiver heure creuse	hiver heure pleine	hiver très froid heure pleine
Nombre de contingences analysées	265	265	265	265
Nombre états non connexes	24	24	24	24
Nombre états non identifiés	24	22	22	27
Nombre de contingences actives	2	7	23	17
Nombre de contingences non actives	215	212	196	197
Nombre de fausses alarmes	0	0	3	1
Erreur 1ère espèce [%]	0	0	1.5	0.5
M1 _k [%]	-	-	1	1
Nombre de contingences critiques non détectées	0	0	2	0
Erreur 2ème espèce [%]	0	0	8	0
M2 _k [%]	-	-	1	-
Nombre de calculs de répartition	0	0	2	1
Nombre de contingences actives	-	-	2	1
Temps CPU [sec.]				
Approche A	204.7 (18.4%)	207.9 (18.8%)	203.5 (16.7%)	200.3 (17.5%)
Approche B	220.1 (19.8%)	234.6 (21.2%)	266.1 (21.8%)	254.2 (22.1%)
Approche C	1112.7	1108.7	1219.8	1147.8

6.4.1. Commentaires

Les commentaires qui vont suivre doivent être considérés avec retenue de par le contexte dans lequel ils sont énoncés. Le nombre de situations de charge à disposition est restreint et la variation de charge autour du point de fonctionnement a été effectuée de manière aléatoire pour chacune des situations considérées. Par conséquent, le nouveau point de fonctionnement obtenu n'est pas nécessairement représentatif de la réalité. Cependant, l'amplitude de la variation de charge choisie est réduite et ne doit pas conduire à une situation de charge totalement isolée de la réalité.

La précision des résultats est le premier critère à prendre en considération. L'erreur de première espèce a tendance à augmenter avec la charge du réseau comme en témoigne le nombre de fausses alarmes obtenu pour chacun des cas de charge analysé. En effet, pour les deux premières situations, le risque est nul. Ces deux situations correspondent à deux cas de charge plus faiblement chargés que les deux autres situations d'hiver heure pleine. Cependant, l'erreur de première espèce reste faible et il convient de la relativiser comme en témoigne l'analyse de la mesure de l'erreur de première espèce M1_k. La valeur maximale enregistrée correspond à une erreur de 4% pour l'estimation de la charge en valeur relative.

L'erreur de seconde espèce présente également une tendance à augmenter lorsque la charge du réseau est plus élevée. Ceci est normal, car le nombre de contingences actives est également plus élevé. Tout comme pour l'erreur de première espèce, cette erreur est tout de même faible et doit être également relativisée au regard de la mesure de l'erreur de deuxième espèce $M2_k$. Elle est du même ordre que celle de l'erreur de première espèce, c'est-à-dire 4%.

L'analyse de l'application des règles présentées au paragraphe 3.5 indique leur efficacité. En effet, pour l'ensemble des contingences où il a été nécessaire de procéder à un calcul de répartition de puissance, la contingence est active. Le nombre des cas où il est nécessaire de recourir à ce calcul est cependant faible.

L'analyse des temps de calcul nécessaires pour effectuer une analyse de sécurité N-1 indique un gain de temps non négligeable du système expert en regard du temps nécessaire avec un calcul de répartition de puissance. Le gain est de l'ordre de 80%. Ce gain est cependant moins élevé que ne le laissait prévoir l'estimation proposée au paragraphe 3.4.1. Ceci provient des limitations soulevées au paragraphe 6.2.1. En effet, le recours à un générateur de systèmes expert a pour conséquence de diminuer les performances en termes de temps de calcul. Cependant, l'utilisation de l'approche proposée au paragraphe 3.3 a pour avantage de pouvoir garantir une stabilité du temps nécessaire pour évaluer une contingence, quel que soit le niveau de charge du réseau. L'analyse du temps de calcul basé sur l'utilisation d'un calcul de répartition de puissance indique que celui-ci est dépendant de la charge du réseau. Le nombre moyen d'itérations nécessaires augmente avec la charge du réseau. L'introduction de l'approche proposée au paragraphe 3.5 a pour conséquence d'augmenter le temps de calcul lorsque la charge du réseau augmente. Ceci est normal, car les règles interviennent lorsque la contingence conduit le réseau à un état d'alerte.

6.5. Validation et évaluation du système expert pour l'analyse de sécurité N-2

Les quatre situations présentées au paragraphe 6.3.5 ont été considérées pour effectuer une analyse de sécurité N-2. Le tableau 6.6 présente les résultats de l'analyse de sécurité N-2 pour chacune des quatre situations, lorsque la charge active et réactive n'a pas été modifiée.

La rubrique "Nombre états non connexes" indique le nombre de contingences simples qui conduisent à un état du réseau non connexe. La rubrique "Nombre états non identifiés" se réfère au nombre de contingences doubles qui conduisent à des situations où le calcul de répartition de puissance ne converge pas. Les contingences qui conduisent à des états du réseau non connexes ou non identifiés ne sont pas pris en considération pour valider et évaluer les performances du système expert pour la situation de charge analysée. Seules les contingences actives et non actives sont considérées pour valider et évaluer le système expert.

Les connaissances considérées comprennent les règles définies au paragraphe 3.3.3. Les critères d'évaluation définis au paragraphe 6.3.3 sont indiqués pour chacune des situations de charge analysées. Le tableau 6.6 indique le nombre de contingences pour lesquelles le principe de superposition ne peut pas être appliqué. Il contient également les temps obtenus pour une analyse de sécurité N-2 en utilisant les approches suivantes :

Approche A : Utilisation des connaissances décrites au paragraphe 3.3.3, c'est-à-dire l'estimation de la charge des branches suite à une contingence.

Approche B: Analyse de sécurité basée uniquement sur l'utilisation d'un calcul de répartition de puissance.

Pour l'approche A, le temps en pourcent par rapport à l'approche B est indiqué entre parenthèses.

Tableau 6.6: Résultats de l'analyse de sécurité N-2 pour chacune des quatre situations considérées.

Point de fonctionnement	été heure pleine	hiver heure creuse	hiver heure pleine	hiver très froid heure pleine
Nombre de contingences analysées	34980	34980	34980	34980
Nombre états non connexes	6132	6132	6132	6132
Nombre états non identifiés	5796	4351	4178	7727
Nombre de contingences actives	430	1250	6299	4541
Nombre de contingences non actives	22622	23247	18371	16580
Nombre de fausses alarmes	0	20	197	51
Erreur 1ère espèce [%]	0	0.09	1.07	0.31
M1 _k [%]	-	5	5	5
Nombre de contingences critiques non détectées	0	20	43	119
Erreur 2ème espèce [%]	0	1.6	0.7	2.6
M2 _k [%]	-	8	5	10
Nombre de cas où le principe de superposition n'est pas applicable	155	424	700	706
Temps CPU [heures]				
Approche A	6h24 (14.6%)	6h59 (15.7%)	7h32 (15.5%)	7h25 (14.7%)
Approche B	43h57	44h28	48h31	50h24

6.5.1. Commentaires

Une première remarque s'impose au regard des chiffres présentés dans le tableau 6.6. Le calcul de répartition de puissance converge en moyenne pour environ 80% des contingences analysées. En tenant compte des contingences où le réseau n'est pas connexe, les contingences pour lesquelles il est possible d'effectuer une comparaison entre les deux approches est compris entre 60% et 70%. En considérant cette première remarque et le nombre restreint de cas de charges à disposition (tout comme pour l'analyse de sécurité N-1), il convient de relativiser les conclusions suivantes.

L'erreur de première et de seconde espèce ont tendance à augmenter lorsque la charge du réseau augmente. L'erreur de première espèce reste cependant suffisamment faible et peut être relativisée au regard de la mesure $M1_k$ qui ne dépasse pas 5%.

Le nombre de contingences non détectées par le système expert a tendance à augmenter avec la charge du réseau. Ce nombre est nul pour un régime de charge d'été et est de l'ordre de 2.6% pour un régime d'hiver très froid. Cependant, les résultats correspondant à cette dernière situation doivent être relativisés. La mesure d'erreur $M2_k$ est au maximum de 5% à l'exception de trois contingences pour lesquelles l'erreur est comprise entre 5% et 10%.

De manière générale, le nombre des contingences pour lesquelles il n'est pas possible d'appliquer le principe de superposition reste limité et est compris entre 0.5% et 2% pour les cas de charge étudiés.

L'analyse des temps de calcul nécessaires pour effectuer une analyse de sécurité N-2 indique un gain de temps non négligeable du système expert en regard du temps nécessaire avec un calcul de répartition de puissance. Le gain est de l'ordre de 85%. Tout comme pour l'analyse de sécurité N-1, le gain est cependant moins élevé que ne le laissait prévoir l'estimation proposée au paragraphe 3.4.2. Ceci provient également des limitations soulevées au paragraphe 6.2.1. L'analyse du temps de calcul basé sur l'utilisation d'un calcul de répartition de puissance indique que celui-ci est dépendant de la charge du réseau mais également des contingences analysées. Par exemple, pour le régime hiver très froid heure pleine (thp), le temps nécessaire est moins élevé que pour le régime hiver heure pleine (hhp), alors que le nombre de contingences à analyser avec un calcul de répartition de puissance est plus élevé.

6.6. Conclusion

Tout au long de ce chapitre, un certain nombre d'indications ont été proposées pour la mise en oeuvre d'un système expert pour l'analyse de sécurité basé sur l'architecture définie au paragraphe 2.5.2. Ce chapitre a tout d'abord examiné la manière de structurer et d'exploiter les différentes formes de connaissances proposées dans les chapitres 3, 4, et 5. Ce chapitre a permis également de s'interroger sur les facteurs qui ont contribué au choix d'un outil de développement pour le prototype. Cependant, l'objectif majeur de ce chapitre a été d'évaluer les performances du système expert développé. Après avoir défini les critères utilisés pour la validation, l'analyse de sécurité N-1 et N-2 a été effectuée pour quatre situations différentes de charge du réseau suisse 380KV/220KV et la partie ouest 125KV. Un des problèmes soulevé tout au long de cette recherche est le manque de données à disposition pour valider le système expert. L'utilisation de quatre situations de charge n'est pas suffisante pour permettre de tirer des conclusions générales. De manière idéale, il est nécessaire de pouvoir accéder aux données correspondantes à l'évolution de la charge du réseau suisse 380KV/220KV et 125-150KV dans son ensemble et pour plusieurs journées entières. Seuls des tests en vraie grandeur peuvent soulever les problèmes inhérents au développement d'une nouvelle approche pour l'analyse de sécurité. Comme le mentionne l'enquête effectuée par la CIGRE [Thr86], un aspect limitatif dans l'emploi d'un programme d'analyse de sécurité est constitué par le manque de données en temps réel. Il

n'est pas possible de considérer un réseau comme une entité en soi. Dans le cas du réseau suisse, chacune des sept compagnies constitue une partie d'un groupe beaucoup plus grand de réseaux interconnectés. Malheureusement, les données en temps réel ne sont généralement disponibles que pour les postes propres à l'une des sept compagnies puisque, jusqu'à ce jour, il existe très peu d'échange de données en temps réel entre compagnies d'électricité. Cette situation oblige les compagnies à représenter leurs voisins à l'aide d'équivalents statiques. Ceux-ci ne peuvent pas être mis à jour pour des changements de topologie ou d'injection de puissance et contribuent par conséquent à des erreurs de diagnostic.

Cependant, l'évaluation du prototype effectuée sous une forme limitée à partir de quatre différentes situations de charge permet de faire ressortir quelques-uns des points forts de l'approche système expert choisie pour l'analyse de sécurité. Ceux-ci sont répertoriés dans la liste suivante :

Robustesse : Les erreurs de première et de seconde espèce sont faibles pour les analyses de sécurité N-1 et N-2. En examinant plus en détail les contingences pour lesquelles le diagnostic n'a pas été suffisamment sélectif, il apparaît que l'erreur maximale d'estimation de charge commise pour l'erreur de première est de 5%. De même l'erreur maximale commise est de l'ordre de 5% à 10% pour l'erreur de seconde espèce. De toute évidence, les résultats obtenus font ressortir le caractère robuste de l'approche choisie.

Rapidité : La comparaison des temps nécessaires pour une analyse systématique des contingences simples indique un gain de l'ordre de 80%. En utilisant une station de travail HP-Apollo DN4500 (processeur MC68030, 25MHz), le temps nécessaire pour une analyse de sécurité N-1 est de 5 minutes. Ce qui permet d'envisager une exploitation en temps réel. De même pour l'analyse de sécurité N-2, le gain de temps obtenu est de l'ordre de 85% et nécessite en moyenne 7 heures pour effectuer une analyse complète avec une station HP-Apollo DN4500.

En considérant les objectifs à atteindre pour une méthode d'analyse de sécurité (cf. chapitre 1), l'approche proposée satisfait le compromis à trouver entre rapidité et précision de la méthode pour l'analyse de sécurité N-1.

Flexibilité : Cette approche est relativement flexible car, dans l'approche choisie, les connaissances spécifiques au réseau traité sont indépendantes de la base de règles et de faits. Seules les règles recueillies auprès des exploitants dépendent du réseau traité, mais celles-ci sont contenues dans une base de règles indépendante. Les connaissances propres à l'analyse de situations antérieures, c'est-à-dire la création d'une base de connaissances quantitatives, peuvent être facilement générées à partir de différents points de fonctionnement pour le réseau considéré.

Possibilité d'extension : En choisissant une approche système expert, il est en tout temps possible d'ajouter ou d'enlever de nouvelles règles. Le prototype développé comprend quelques 150 règles de base qui assurent le fonctionnement logique du processus de recherche de diagnostic. A côté de ces règles de base qui constituent le noyau du système expert, il est possible d'enrichir le système de règles propres au réseau considéré (cf. chapitre 5). Ces règles sont introduites sous forme d'une description compacte qui ne nécessite aucune connaissance

spécifique de l'outil utilisé pour le développement du système expert. Par contre, il est nécessaire de connaître Nexpert Object pour modifier, ajouter ou supprimer une règle du noyau de base de l'application.

En résumé, les performances obtenues en validant le prototype développé, à l'aide d'un nombre restreint de situations de charge, laissent entrevoir un avenir prometteur. Il s'agit maintenant d'intégrer l'approche proposée dans un centre de conduite.

Chapitre 7

Conclusion

Ce travail de doctorat a porté sur la conception d'une approche système expert pour l'analyse de sécurité en régime permanent d'un réseau électrique. L'approche proposée s'est concentrée sur la détermination des contingences critiques qui créent des violations de contraintes thermiques. Les propos suivants constituent une récapitulation de quelques-uns des points essentiels qui constituent le fondement de ce travail. Quelques indications concernant des possibilités de recherches futures seront également proposées.

Proposition d'une approche

Ce travail s'est tout d'abord attaché à analyser les différentes approches proposées dans la littérature en essayant de rassembler les principales idées sous-jacentes aux publications scientifiques qui traitent de l'analyse de sécurité. Les différentes techniques proposent un compromis entre rapidité et précision de la méthode en regard d'une approche basée sur l'analyse d'une contingence à l'aide d'un calcul de répartition de puissance. Une approche système expert a été choisie, car elle est tout à fait appropriée pour émettre un diagnostic suite à une contingence et à satisfaire le compromis énoncé auparavant. Après avoir présenté les mécanismes de représentation de connaissances et de parcours des connaissances par un système expert, une architecture a été proposée pour la conception d'un système expert pour l'analyse de sécurité. L'architecture proposée est hybride, car elle fait aussi bien appel à des connaissances quantitatives que qualitatives.

Acquisition de connaissances

L'effort principal de ce travail a été consacré à l'acquisition des connaissances nécessaires pour le traitement d'une contingence. Deux approches distinctes ont été utilisées.

D'une part, une méthode a été proposée pour l'acquisition de connaissances quantitatives basée sur l'exploitation des résultats d'une analyse systématique des contingences simples. Cette méthode constitue une base de connaissances quantitative pour différents points de

fonctionnement du réseau électrique. Une première utilisation de cette base de connaissances est proposée pour estimer la charge des branches du réseau suite à une contingence simple ou double. Une seconde utilisation consiste à extraire des règles qualitatives pour une contingence sur la base de similarités observées pour différents points de fonctionnement.

D'autre part, une méthode basée sur l'utilisation de sous-ensembles flous est proposée pour exploiter les connaissances qualitatives recueillies auprès des experts. La notion de sous-ensemble flou a été appliquée aux différents facteurs considérés par un exploitant pour déterminer la sécurité du réseau suite à une contingence. Le recours aux mathématiques floues a été imposé par la nature subjective des connaissances recueillies auprès des experts et plus particulièrement par le contenu imprécis et incertain des connaissances traitées.

Il faut également mentionner la recherche effectuée pour intégrer les méthodes de classement de contingences au sein d'un système expert. Ces méthodes sont largement utilisées pour traiter la sécurité d'un réseau électrique, mais elles ne conduisent pas à un classement sans erreur. Dans le cadre du système expert proposé, leur mise en oeuvre peut être facilitée en exploitant la base de connaissances quantitatives constituée pour un point de fonctionnement du réseau électrique.

Une approche basée sur les moindres carrés récursifs a été proposée pour estimer la valeur de l'indice de performance limite associé à un point de fonctionnement différent de celui pour lequel le classement a été établi.

Validation de l'approche proposée

L'approche a été validée à l'aide d'un prototype de système expert développé à l'aide de l'outil Nexpert Object. Les critères de validation ont été choisis sur la base du compromis fixé par le choix de l'approche, c'est-à-dire la précision et la rapidité de l'approche système expert. L'évaluation du prototype a été effectuée à partir de quatre différentes situations de charge pour le réseau suisse à haute tension. L'approche proposée est performante. D'une part, le gain de temps en comparaison d'une approche classique basée sur l'utilisation d'un calcul de répartition de puissance est de l'ordre de 80% pour une analyse de sécurité N-1 et 85 % pour une analyse de sécurité N-2. D'autre part, l'efficacité du diagnostic permet de déterminer avec exactitude le comportement du réseau électrique pour une contingence spécifiée. Les erreurs de première et de seconde espèce sont modestes et peuvent être relativisées en considérant l'erreur maximale commise pour l'estimation des transits de puissance à l'aide de la base de connaissances quantitative. Elle est de l'ordre de 5% et ceci pour des branches qui sont proches de la limite thermique suite à la contingence.

En résumé, l'approche proposée est réjouissante. Cependant, il n'est pas possible de conclure prématurément du succès de cette approche sur la base d'un nombre restreint de cas de charges et sans avoir pu la valider dans un centre de conduite.

7.1. Directions de recherches futures

Ce travail défend l'intérêt d'une méthode d'analyse de sécurité basée sur une approche système expert qui fait appel aussi bien à des connaissances quantitatives que qualitatives. Ce travail s'est limité à l'identification des contingences qui créent des surcharges.

Une première direction de recherche consiste à étendre l'approche proposée à l'analyse des contingences qui créent des violations de contraintes de tension. La constitution d'une base de connaissances quantitative pour identifier les contingences qui créent des violations de contraintes de tension a été également étudiée et présentée dans un article [Bar90]. Cette première étude a soulevé des problèmes pour l'estimation des tensions suite à une contingence et plus particulièrement pour l'application du principe de superposition utilisé pour les contingences doubles. Les problèmes observés proviennent essentiellement des non-linéarités introduites par le changement de gradin automatique des transformateurs suite à une contingence. Il conviendrait de reprendre la formulation du coefficient d'influence de tension de manière à intégrer les non-linéarités introduites par les transformateurs à gradin.

Ce travail a présenté une approche basée sur le recours aux mathématiques floues pour l'exploitation des connaissances recueillies auprès des experts. Une deuxième direction de recherche consiste à étendre l'application des mathématiques floues en effectuant un travail qui peut être celui d'un anthropologue. Il consisterait à déterminer plus en détail les différents facteurs considérés par les exploitants et, également, de déterminer et ajuster les fonctions d'appartenance de chacun des sous-ensembles flous associés aux facteurs considérés. D'un point de vue théorique, il serait souhaitable de disposer d'une comparaison de l'approche mathématique floues et de l'approche Dempster-Shafer [Sha76] en l'appliquant au traitement des connaissances recueillies. Il serait également souhaitable d'étendre l'application de l'une ou l'autre des deux approches à la confrontation des diagnostics obtenus par les différentes sources de connaissances consultées. Finalement, il convient d'envisager la possibilité de générer automatiquement des règles à partir de l'analyse de situations temps réel.

Une troisième approche consisterait à traiter le problème des recommandations à proposer à l'opérateur pour éviter ou supprimer les conséquences d'une contingence critique. Le sujet a été quelque peu effleuré dans le cadre de ce travail. A nouveau, le recours à un système expert hybride doit permettre de proposer rapidement à l'opérateur les mesures d'urgence à prendre.

Bibliographie

-
- [Alb82] Albuyeh F., Bose A., Heath B., "Reactive Power Considerations In Automatic Contingency Selection", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, No. 1, pp. 107-112, January 1982
- [Bac91] Bacher R., "Neue Konzepte bei der Echtzeit-Berechnung der (n-1)- Sicherheit im elektrischen Energieübertragungsnetz", Bulletin ASE/UCS, pp. 9-14, August 1991 und pp. 39-45, Dezember 1991
- [Bal89] Baldwin L. P., Kazibwe W. E., Reppen D. N., Woodzell G. W., "An Investigation Of Expert System Applications To Contingency Selection And Analysis", Second Symposium On Expert Systems Application To Power Systems, pp. 165-169, July 1989
- [Bal92] Balu N., Bertram T., Bose A., Brandwajn V., Cauley G., Curtice D., Fouad A. Fink L., Lauby M.G., Wollenberger B.F., Wrubel J.N., "On-line Power System Security Analysis", Proceedings of the IEEE, Vol. 80, No. 2, pp. 260-280, February 1992
- [Bar88] Barras J., "Repartition des puissances et analyse de sécurité des réseaux électriques par les méthodes de flot dans les graphes", Thèse de doctorat No. 756, EPFL, Lausanne 1988
- [Bar90] Bart A., Tinguely C., Chamorel P.A., Germond A.J., "Algorithmic and Heuristic Method Applied to Security Analysis of Large Power Systems", Proc. of the 10th PSCC Graz Austria, pp. 840-847, 1990
- [Ber90] Bertram T.J., Demaree K.D., Dangelmaier L.C., "An Integrated Package for Real-Time Security Enhancement", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 5, No. 2, pp. 592-600, May 1990
- [Bla37] Black M., "Vagueness: An Exercise in Logical Analysis", Philosophy of Science, Vol. 4, pp. 427-455, 1937
- [Boi78] Boite R., Neiryneck J., "Théorie des réseaux de Kirchhoff", Editions Georgi, ISBN2-604-00028-8, St-Saphorin Suisse, 1978
- [Bon86] Bonnet A., Haton J.-P., Bouzid N., Truong-Ngoc J.M., "Systèmes experts, Vers la maîtrise technique", InterEditions, ISBN2-7296-0144-9, Paris, Août 1986
- [Bra89] Brandwajn V., Lauby M.G., "Complete Bounding Method for AC Contingency Screening", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 4, No.2, pp. 724-727, May 1989

- [Bra91] Brandwajn V., Liu Y., Lauby M.G., "Pre-screening of Single Contingencies Causing Network Topology Changes", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 6, No.2, pp. 30-35, February 1991
- [Bra88] Brandwajn Vladimir, "Efficient Bounding Method For Linear Contingency Analysis", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 3, No.1, pp. 38-43, February 1988
- [Bry88] Bryant N., "Managing Expert Systems", Jon Wiley & Sons, ISBN 0-471-91341-3, 1988
- [Bul90] Bull F. R., "Intelligence artificielle et bon sens", Masson, ISBN 2-225-82263-8, Paris 1990
- [Car63] Carpentier M., "Application de la Méthode de Newton au Calcul des Réseaux Maillés", Power Systems Computation Conference, Queen Mary College, London 1963
- [Cha83] Chamorel P.A., "Optimisation des puissances actives et réactives par la programmation linéaire dans les réseaux électriques à haute tension", Thèse de doctorat No. 496, EPFL, Lausanne 1983
- [Cha89] Chang C.L., Hsu Y., "Deterministic and Probabilistic Contingency Selection", Journal of the Chinese Institute of Engineers, Vol. 12, No.6, pp. 771-780, 1989
- [Cha90] Chang C.L., Hsu Y.Y., "Steady-state Security Control Using a Sensitivity-based Approach", Electric Power Systems Research, Vol. 18, No. 1, pp. 1-10, 1990
- [Cha90] Chang C.S., Chung T.S., Lo K.L., "Application Of Pattern Recognition Technique To Power System Security Analysis And Optimization", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 5, No. 3, pp. 835-841, August 1990
- [Che90] Chen Y., Bose A., "Security Analysis For Voltage Problems Using A Reduced Model", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 5, No. 3, pp. 933-940, August 1990
- [Che84] Cheng J.W.M., Galiana F.D., "Contingency Severity Selection Based on Flow Bounds : Numerical experience", Proceedings of the eighth Power Systems Computation Conference, Helsinki , pp. 637-41, August 19-24 1984
- [Chr89] Christie D. R., Talukdar S. N., Nixon J. C., "A Hybrid Expert System For Security Assesment", IEEE PICA Seattle, No.1, pp. 267-273, June 1989
- [Chr88] Christie R. D., Talukdar S. N., "Expert Systems for On Line Security Assesment a Preliminary Design", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 3, No.2, pp. 654-659, May 1988
- [Chr89] Christie R. D., Talukdar S. N., "Discrete Approximations and Means-Ends Analysis For Static Security Assesment", Second Symposium On Expert Systems Application To Power Systems, pp. 177-182, July 1989
- [Cih69] Cihlar T.C., Wear J.H., Ewart D.N., Kirchmayer L.K., "Electric Utility System Security", Proceedings of the American Power Conference, Vol. 31, pp. 97-109, 1969
- [Civ86] Civanlar M.R., Trussell H.J., "Constructing Membership Functions Using Statistical Data", Fuzzy Sets and Systems, Vol. 18, pp. 1-13, 1986

- [Dab86] Dabbaghchi I., Irisarri G., "AEP Contingency Selector : Branch Outage Impacts on Load Bus Voltage Profile", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. PWRS-1, No.2, pp. 37-45, May 1986
- [Del90] Delfino B., Denegri G.B., Invernizzi M., Canonero A., Forzano P., "An Intelligent Supporting Aid For Resolving Operations under Overload Conditions In Electric Power Systems, Electrical Power & Energy Systems, Vol 12, No. 3, pp. 183-191, July 1990
- [Des90] Descartes, "Discours de la méthode", Presses Pocket, ISBN 2-266-03093-0, Paris 1990
- [Dev85] Devi B.B., Sarma V.V.S., "Estimation of Fuzzy Memberships from Hystograms", Information Sciences, Vol. 35, pp. 43-59, 1985
- [Dew71] Dewey A.G., Tuel W.G., "Power System Security Indices", Power Industry Computer Application Conference Boston, pp. 365-736, 23-26 May 1971
- [Dil90] Dillon T. S., Laughton M.A., et. al., "Expert System Applications in Power Systems", Prentice Hall, ISBN 0-13-295767-1, 1990
- [Dom88] Dominé C.-H., "Techniques de l'intelligence artificielle, un guide structuré", Dunod Informatique, ISBN 2-04-018680-8, Paris 1988
- [Dub85] Dubois D., Prade H., "Théorie des possibilités", Masson, ISBN 2-225-80579-2, Paris, mai 1985
- [Dy67] Dy Liacco T. E., "The Adaptive Reliability Control System", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-86, No.5, pp. 517-531, May 1967
- [Dy78] Dy Liacco T. E., "System Security : The Computer's Role", IEEE Spectrum, Vol. 9, pp. 43-50, June 1978
- [Eje88] Ejebe G.C., Van Meeteren H. P., Wollenberger B. F., "Fast Contingency Screening and Evaluation for Voltage Security Analysis", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 3, No.4, pp. 1582-1590, November 1988
- [Eje79] Ejebe G.C. Wollenberger B. F., "Automatic Contingency Selection", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-98, No.1, pp. 97-109, Jan/Feb 1979
- [Enn82] Enns M. K., Quada J. J., Sackett B., "Fast Linear Contingency Analysis", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, No.4, pp. 783-791, April 1982
- [Fer89] Ferreira, "Sensitivity Analysis and Contingency Evaluation By Adjoint Network-Based Methods", Electrical Power & Energy Systems, Vol. 11, No.1, pp. 57-63, January 1989
- [Fis86] Fischl R., Halpin T.F., Helferty J.J., Gershman V., Mercede F., "An Algorithm For Automatically Tuning The Weights Of Performance Indices For Monitoring Power System Loading Or Security", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. PWRS-1, No. 3, pp. 207-213, August 1986
- [Fra82] Frank C. J., "Feasibility of Using Associative Memories for Static Security Assessment of Power System Overloads", EPRI EL-2343, Project 1047-2, April 1982

- [Gal84] Galiana F.D., "Bound Estimates of the Severity of Line Outages in Power System Contingency Analysis and Ranking", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-103, No.9, pp. 2612-2624, September 1984
- [Gar87] Garvizu F., "Calcul local des puissances dans un réseau électrique à l'aide des méthodes de graphes", Thèse de doctorat No. 670, EPFL, Lausanne 1987
- [Ger89] Germond A.J., "Etude internationale des utilisations actuelles et futures des systèmes experts pour l'analyse des réseaux et les techniques associées", *Electra*, No 123, pp. 71-87, Mars 1989
- [Ger92] Germond A.J., Niebur D., "Survey of Knowledge-Based Systems in Power Systems: Europe", *Proceedings of the IEEE*, Vol. 80, No. 5, pp. 1-13, May 1992
- [Gon86] Gondran M., "Introduction aux Systèmes Experts", Eyrolles, Paris, 1986
- [Haf70] Hafner, "Studies in the History of Statistics and Probability", Pearson and Kendall eds., pp. 131-153, 1970
- [Hal84] Halpin T.F., Fischl R., Fink R., "Analysis of Automatic Contingency Selection Algorithms", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-103, No.5, pp. 938-945, May 1984
- [Han91] Handschin E., Hoffmann W., "Integration Of an Expert System For Security Assessment Into an Energy Management System, Proc. of the 3rd ESAP, Tokyo & Kobe, Japan, pp. 364-369, April 1991
- [Har90] Harmon P., Sawyer B., "Creating Expert Systems", John Wiley & Sons, ISBN 0-471-61496-3, New York 1990
- [Hat91] Haton J.-P., Bouzid N., Charpillet F., Haton M.-C., Lâasri B., Lâasri H., Marquis P., Mondot T., Napoli A., "Le raisonnement en intelligence artificielle", InterEditions, ISBN2-7296-0335-2, Paris, Octobre 1991
- [Hof90] Hoffmann W., "Wissenbasiertes System für die Bewertung und Verbesserung der Netzsicherheit elektrischer Energieversorgungssysteme", Dissertation, Universität Dortmund, 1990
- [Hsu92] Hsu Y.Y., Kuo H.C., "Fuzzy-Set Based Contingency Ranking", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 7, No.3, pp. 1189-1196, August 1992
- [Hsu91] Hsu Y.Y., Su C.C., "A rule-based expert system for steady-state stability analysis", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 6, No.2, pp. 771-777, May 1991
- [Iri79] Irissari G.D., Levner D., "Automatic Contingency Selection for On-Line Security Analysis - Real-Time Tests", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-98, No.5, pp. 1552-1559, Sept/Oct 1979
- [Iri81] Irissari G.D., Sasson A. M., "An Automatic Contingency Selection Method for On-Line Security Analysis", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-100, No.4, pp. 1838-1844, April 1981
- [Kau85] Kaufmann A., Gupta M.M., "Introduction to Fuzzy Arithmetic : Theory and Applications", Van Nostrand Rheinhold, New-York, 1985

- [Kay84] Kaye R.J., Wu F.F., "An analysis of Linearized Decoupled Power Flow Approximations for Steady-State Security Assessment", IEEE Transactions on Circuits and Systems, Vol. CAS-31, No.7, pp. 623-36, July 1984
- [Khu82] Khu K. T., Maria G., Lauby M. G., Bowen D. W., "A Fast Linearization Method To Evaluate the Effects of Circuit Contingencies Upon System Load-Bus Voltages", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101 No.10, pp. 3926-3932, October 1982
- [Kim85] Kim J., Maria G., Wong V., "Contingency Ranking and Simulation for On-Line Use", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-104, No.9, pp. 2401-2407, September 1985
- [Kli88] Klir G.J., Folger T.A., "Fuzzy Sets, Uncertainty, and Information", Prentice-Hall International Editions, ISBN0-13-345638-2, New-York, 1988
- [Lau88] Lauby M.G., "Evaluation of a Local DC Flow Screening Method for Branch Contingency Selection of Overlads", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 3, No.3, pp. 923-928, August 1988
- [Lau83] Lauby M.G., Mikolinnas T. A., Reppen N. D., "Contingency Selection of Branch Outages Causing Voltage Problems", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-102, No.12, pp. 3899-3904, December 1983
- [Liu90] Liu C.C., Damborg M.J., "CRAFT: On-Line Expert System for Customer Restoration and Fault Testing", EPRI EL-6796, Volume 1, Project 2944-1, March 1990
- [Lo 89] Lo K.L., Bismil M.A.; McColl R.D., Moffatt A.M., "Comparison of Voltage Ranking Methods", Electric Power Systems Research, Vol. 16, No. 2, pp. 127-140, 1989
- [Lo 88] Lo K.L., Bismil M.A.; McColl R.D., Moffatt A.M., "Comparison of MW Ranking Methods", Electric Power Systems Research, Vol. 15, pp. 157-171, 1988
- [McC83] McClelland E. C., Van Horne P. R., "Fast Voltage Prediction Using a Knowledge Based Approach", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-102, No.2, pp. 315-319, February 1983
- [Med82] Medicherla T. K. P., Rastogi S. C., "A Voltage-Criterion Based Contingency Selection Technique", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, September 1982, Vol. PAS-101, No.9, pp. 3523-3531, September 1982
- [Mel90] Melipoulos A.P.S., Cheng C., "A Hybrid Contingency Ranking Method", Proc. of the 10th PSCC Graz Austria, pp. 605-612, 1990
- [Men87] Mendel J.M., "Lessons in Digital Estimation Theory", Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, ISBN 0-13-530809-7, New Jersey, 1987
- [Mer83] Merlin A., "Evaluation et amélioration de la sécurité de fonctionnement des réseaux électriques dans leur conduite en temps réel", CIGRE/IFAC Symposium : Control applications for power system security, pp. 1-8, 26-28 September 1983
- [Mik81] Mikolinnas T.A., Wollenberger B.F., "An Advanced Contingency Selection Algorithm", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, No.2, pp. 608-617, February 1981
- [Min75] Minsky M., "A Framework for Representing Knowledge", The psychology of computer vision, McGraw-Hill, New-York, pp. 211-281, 1975

- [Mom89] Momoh J.A., Chuku A.U., "Application of Expert System for Improved Contingency Analysis and Optimal Correction", Proceedings of the twenty first annual North America Power Symposium, pp. 33-37, October 9-10 1989
- [Mor90] Moreschini G., Menditto V., Ricci P., "A Method For Probabilistic Power Systems Security Assessment", Proc. of the 10th PSCC Graz Austria, pp. 854-861, 1990
- [Nar85] Nara K., Tanaka K., Shoults R. R., Chen M. S., Van Olinda P., "On-Line Contingency Selection Algorithm For Voltage Security Analysis", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-104, No.4, pp. 847-856, April 1985
- [Neu63] Von Neumann J., "Design of Computers, Theory of Automata and Numerical Analysis", Pergamon Press, Oxford, 1963
- [Neu91] Neuron Data, "Nexpert Object : Functional Description", Neuron Data documentation, Palo Alto 1991
- [Nie92] Niebur D., Germond A.J., "Power System Static Security Assessment Using the Kohonen Neural Network Classifier", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 7, No.2, pp. 865-872, May 1992
- [Oh 86] Oh Se-Young, "A Pattern Recognition and Associative Memory Approach to Power System Security Assessment", IEEE Transactions on Systems, Man, And Cybernetics, Vol. SMC-16, No. 1, pp. 62-72, January/February 1986
- [Pan73] Pang C.K., Prabhakara F. S., El-Abiad A. H., Koivo A. J., "Security Evaluation In Power Systems Using Pattern Recognition", IEEE PES Summer Meeting Vancouver Canada, pp. 969-976, July 1973
- [Pao84] Pao Y.H., Dy Liacco T.E., "Artificial Intelligence and the Control of Electric Power Systems", Proceedings of the Ninth Triennial World Congress of IFAC, pp. 2059-2064, Budapest, 2-6 July 1984
- [Pao81] Pao Y., Oh S., "A Rule-Based Approach to Electric Power Systems Security Assessment", IEEE Computer Application Society Conference on Pattern Recognition, pp. 340-2, 1981
- [Par88] Parsaye K., Chignell M., "Expert Systems for Experts", John Wiley & Sons, ISBN 0-471-60721-5, New York 1988
- [Ros81] Rossier C., "Analyse de la sécurité d'exploitation d'un réseau électrique", Bulletin ASE/UCS, No.1, pp. 2-7, January 1981
- [San86] Sandberg U., "Security Analysis Functions In Power System Control Centers - A Critical Review", 2nd Int. Conf. on Power System and Control Durham, pp 29-34, 1986
- [Sas89] Sasaki H., Yorino N., Yokoyama R., "An Expert System For Power System Security Control", Power Industry Computer Application Conference Seattle Washington, pp. 259-266, May 1989
- [Sch90] Schäfer K.F., Verstege J.F., "Adaptive Procedure for Masking Effect Compensation in Contingency Selection Algorithms ", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 5, No. 2, pp. 539-546, May 1990

- [Sch89] Schlueter R. A., Sekerke J.E., Burnett K. L., Costi A. G., "Improved Contingency Measures For Operation And Planning Applications", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 4, No.4, pp. 1430-1437, October 1989
- [Sha76] Shafer G., "A Mathematical Theory of Evidence", Princeton University Press, London 1976
- [Sha87] Shafer G., Logan R., "Implementing Dempster's rule for hierarchical evidence", Artificial Intelligence, No 33, p.271-298,1987
- [Sha87] Shah S.S., "Application of Expert Systems to Security Analysis in a Power Network Environment", Proceedings of the American Power Conference, pp. 780-8, 27-29 April 1987
- [Sin88] Sinha A.K., Nagrath I.J., "Optimal pattern classifier for power system steady state security assessment", Modelling, Simulation & Control A, Vol. 19, No. 1, pp. 19-46, 1988
- [Sob87] Sobajic D. J., Pao Y. H., "An Artificial Intelligence System for Power System Contingency Screening", IEEE-PICA Conference Montreal Quebec, p. 107-113, May 1987
- [Sta68] Stagg and El-Abiad, "Computer Methods in Power System Analysis", International Student Edition, McGraw-Hill Kogakusha, 1968
- [Sto85] Stott B., Alsac O., Alvarado F. L., "Analytical and Computational Improvements In Performance-Index Ranking Algorithms For Networks", Electrical Power and Energy Systems, Vol. 7, No.3, pp. 154-160, July 1985
- [Tal90] Talukdar S., Christie R., "An Extended Framework for Security Assessment", Proc. of the 10th PSCC Graz Austria, pp. 880-886, 1990
- [Tan85] Tanaka K., Kodoma H., Shoults R. R., Chen M.S., Van Olinda P., Bertagnolli D., "On-Line Contingency Selection Algorithm for Voltage Security Analysis", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-104, No.4, pp. 847-856, April 1985
- [Tay91] Taylor D.G., Maahs L.J., "A Reactive Contingency Analysis Algorithm Using MW and MVAR Distribution Factors", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 6, No.2, pp. 349-355, February 1991
- [Thu86] Thurein I.P., "Suffisance des outils d'évaluation de sécurité pour l'exploitation des réseaux", CIGRE Proceedings of the 32nd Session. International Conference on Large High Voltage Electric Systems, pp. 39.02/1-6, 27 Aug.-4 Sept. 1986
- [Tin91] Tinguely C., Bart A., Germond A.J., "Knowledge Acquisition for Security Analysis", Proc. of the 3rd ESAP, Tokyo & Kobe, Japan, pp. 530-537, April 1991
- [Vem83] Vemuri S., Usher R. E., "On-Line Automatic Contingency Selection Algorithms", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-102, No.2, pp. 346-354, February 1983
- [Ver87] Verstege J.F., Schäfer K.F., "An Adaptive Model For Improved On-Line Contingency Selection", Proc. of the 9th PSCC Cascais Portugal, pp. 592-598, 1987
- [Wal88] Walters J.R., Nielsen N.R., "Crafting Knowledge-Based Systems", Wiley-Interscience, ISBN 0-471-62480-2,1988

- [Was83] Wasley R. G., Daneshdoost M., "Identification and Ranking of Critical Contingencies in Dependent Variable Space", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-102, No.4, pp. 881-889, April 1983
- [Wat86] Waterman D.A., "A Guide to Expert Systems", Addison-Wesley, ISBN 0-201-08313-2, 1986
- [Wu 83] Wu F.F., "A Unified Approach to Security Assessment", CIGRE/IFAC Symposium : Control applications for power system security, pp. 1-8, 26-28 September 1983
- [Wu 86] Wu F.F., Monticelli A., "Recent Progress in Real-Time Network Security Analysis", Power Systems and Power Plant Control. Proceedings of the IFAC Symposium, Beijing, pp. 11-17, 12-15 August 1986
- [Zab80] Zaborszky J., Whang K. W., Prasad K., "Fast Contingency Evaluation Using Concentric Relaxation", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-99, No.1, pp. 28-36, Janv/Fev 1980
- [Zad65] Zadeh L.A., "Fuzzy Sets", Information and Control, Vol. 8, pp. 338-353, 1965
- [Zad74] Zadeh L. A., Fu K.S., Tanaka K., Shimura M., "Fuzzy Sets and Their Applications to Cognitive and Decision Processes", Academic Press Inc., Proceedings of the U.S.-Japan Seminar on Fuzzy Sets and Their Applications, Berkeley, California, July 1-4 1974
- [Zay91] Zayadine M., "Analyse et évaluation des méthodes de classement des contingences par ordre de sévérité à l'aide d'indices de performance", Rapport interne du projet de de 8ème semestre, Lausanne 1991
- [Zha89] Zhang Z. Z., Hope G. S., Malik O. P., "Expert Systems In Electric Power Systems - A Bibliographical Survey", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 4, No.4, pp. 1355-1362, October 1989

Annexe A

Moindres carrés récursifs

En premier, il convient d'exprimer sous la forme explicite la fonction objectif $J[\hat{q}(k)]$ [Men87]:

$$\begin{aligned} J[\hat{\theta}(k)] &= \tilde{Z}^t(k) \cdot W(k) \cdot \tilde{Z}(k) = [Z(k) - \hat{Z}(k)]^t(k) \cdot W(k) \cdot [Z(k) - \hat{Z}(k)] \\ &= [Z(k) - H(k) \cdot \hat{\theta}(k)]^t \cdot W(k) \cdot [Z(k) - H(k) \cdot \hat{\theta}(k)] \\ &= Z^t(k) \cdot W(k) \cdot Z(k) - 2 \cdot Z^t(k) \cdot W(k) \cdot H(k) \cdot \hat{\theta} + \hat{\theta}^t \cdot H^t(k) \cdot W(k) \cdot H(k) \cdot \hat{\theta}(k) \end{aligned}$$

- N : Nombre de mesures.
 n : Nombre de paramètres à estimer.
 k : Numéro de la mesure.
 J : Fonction objectif.
 Z (Nx1) : Vecteur de mesures.
 θ (nx1) : Vecteur des n paramètres à estimer.
 H (Nxn) : Matrice d'observation.
 W (Nx1) : Vecteur du bruit attaché à chaque mesure.

Il est ensuite nécessaire de dériver $J[\hat{\theta}(k)]$ de manière à obtenir un minimum, en considérant au préalable les deux formules de calcul vectoriel suivantes :

Si b et c sont deux vecteurs de dimension (n), et A une matrice symétrique de taille (nxn) alors :

$$\frac{d}{db}(c'b) = c$$

et

$$\frac{d}{db}(b'Ab) = 2Ab$$

En utilisant les relations précédentes :

$$\frac{dJ[\hat{\theta}(k)]}{d\hat{\theta}(k)} = -2 \cdot [Z^t(k) \cdot W(k) \cdot H(k)]^{-1} + 2 \cdot H^t(k) \cdot W(k) \cdot H(k) \cdot \hat{\theta}(k)$$

En posant $\frac{dJ[\hat{\theta}(k)]}{d\hat{\theta}(k)} = 0$, on obtient :

$$\hat{\theta}(k) = [H^t(k) \cdot W(k) \cdot H(k)]^{-1} \cdot H^t(k) \cdot W(k) \cdot Z(k)$$

Annexe B

Mesure d'intersection pour une fonction d'appartenance trapézoïdale

Cette annexe présente le calcul des grandeurs $P(B/A)$, $N(B/A)$ pour une distribution trapézoïdale de possibilité [Hat91]. La figure B.1 indique la notation utilisée pour décrire les deux distributions trapézoïdales A et B.

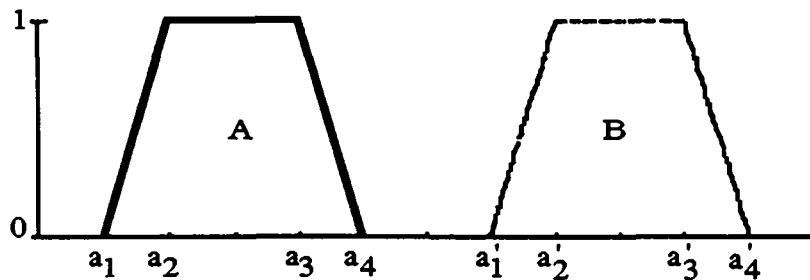


Figure B.1 : Distributions trapézoïdales A et B

$$A1 = 1 + \frac{a_3 - a_2}{a_2 - a_1 + a_4 - a_3}$$

$$A2 = 1 + \frac{a_3 - a_2}{a_2 - a_1 + a_4 - a_3}$$

$$A3 = \frac{a_2 - a_1}{a_2 - a_1 + a_2 - a_1}$$

$$A4 = \frac{a_4 - a_3}{a_4 - a_3 + a_4 - a_3}$$

$$P(B/A) = \max(0, \min(1, A1, A2))$$

$$N(B/A) = \max(0, \min(1, A3, A4))$$

Annexe C

Schéma du réseau (chapitre 6)

Cette annexe contient une représentation graphique du réseau électrique présenté au paragraphe 6.3.5.1 en considérant séparément chacun des niveaux de tension.

De manière à assurer une confidentialité des données qui nous ont été fournies par EOS, les noeuds du réseau ont été numérotés. Il n'y a pas de correspondance avec la position géographique.

Le premier chiffre "a" de chaque noeud (Bus_axxx) correspond au niveau de tension (3 pour 380KV, 2 pour 220KV et 1 pour 125KV). Pour les transformateurs, les numéros "xxx" sont identiques pour le niveau basse et haute tension des noeuds reliés par le transformateur.

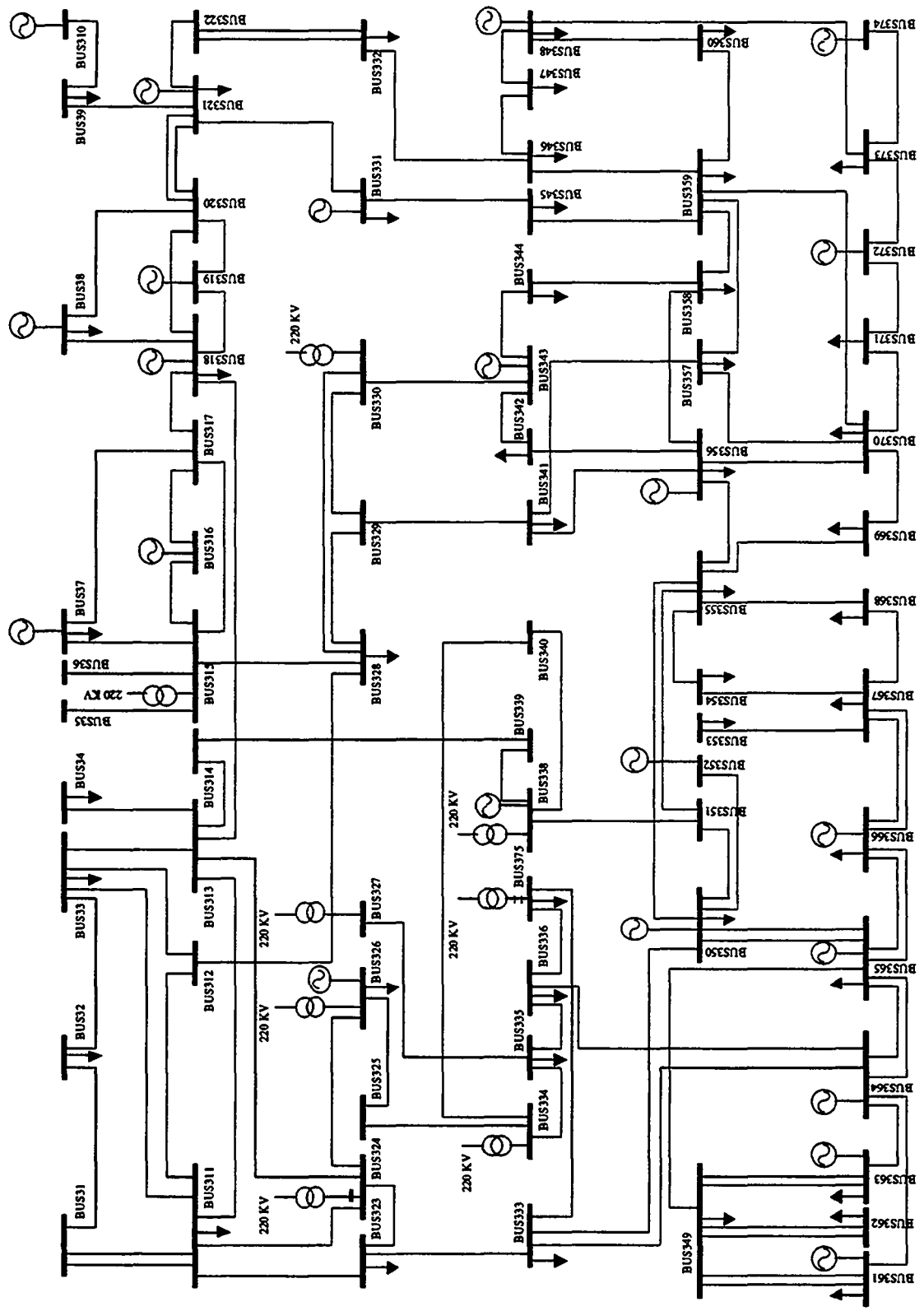


Figure C.1 : Représentation graphique du réseau électrique pour le niveau de tension 380KV

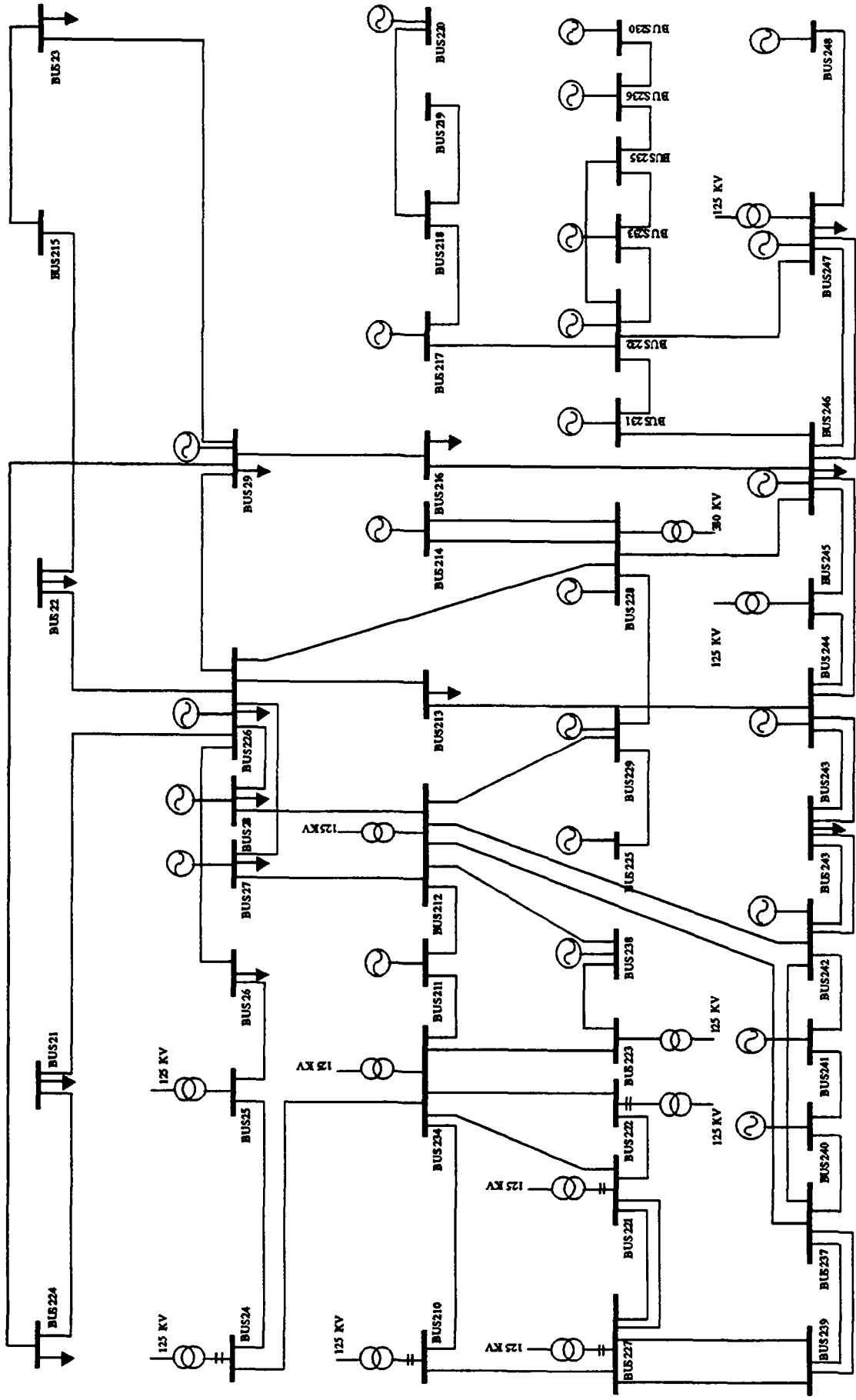


Figure C.2 : Représentation graphique du réseau électrique pour le niveau de tension 220KV

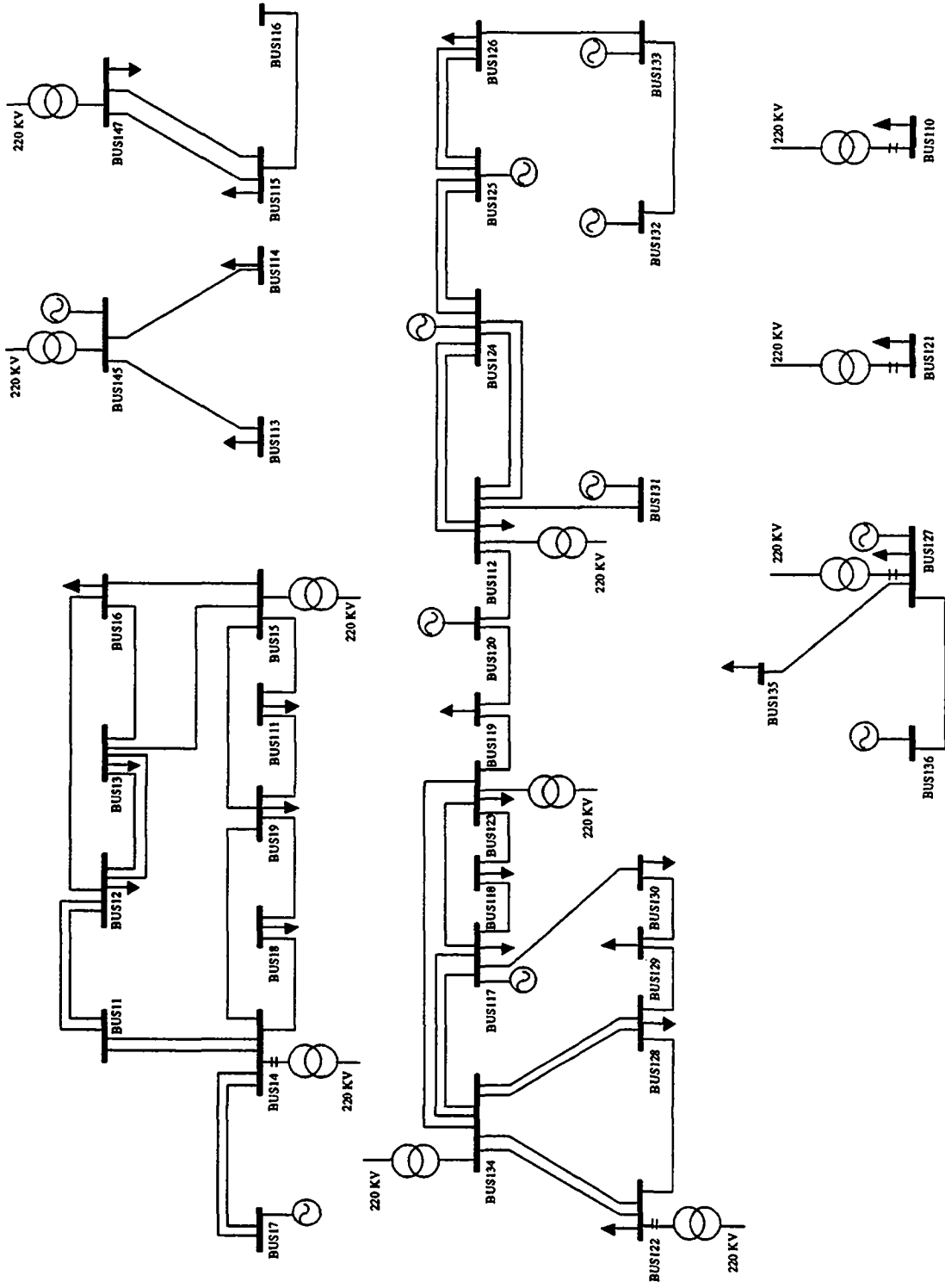


Figure C.3 : Représentation graphique du réseau électrique pour le niveau de tension 125KV

Annexe D

Schéma du réseau (chapitre 5)

Cette annexe contient une représentation graphique du réseau électrique traité au paragraphe 5.9. Les conventions de l'annexe C sont utilisées pour la numérotation des noeuds. Il n'y a pas de correspondance entre la numérotation des noeuds de l'annexe C et D.

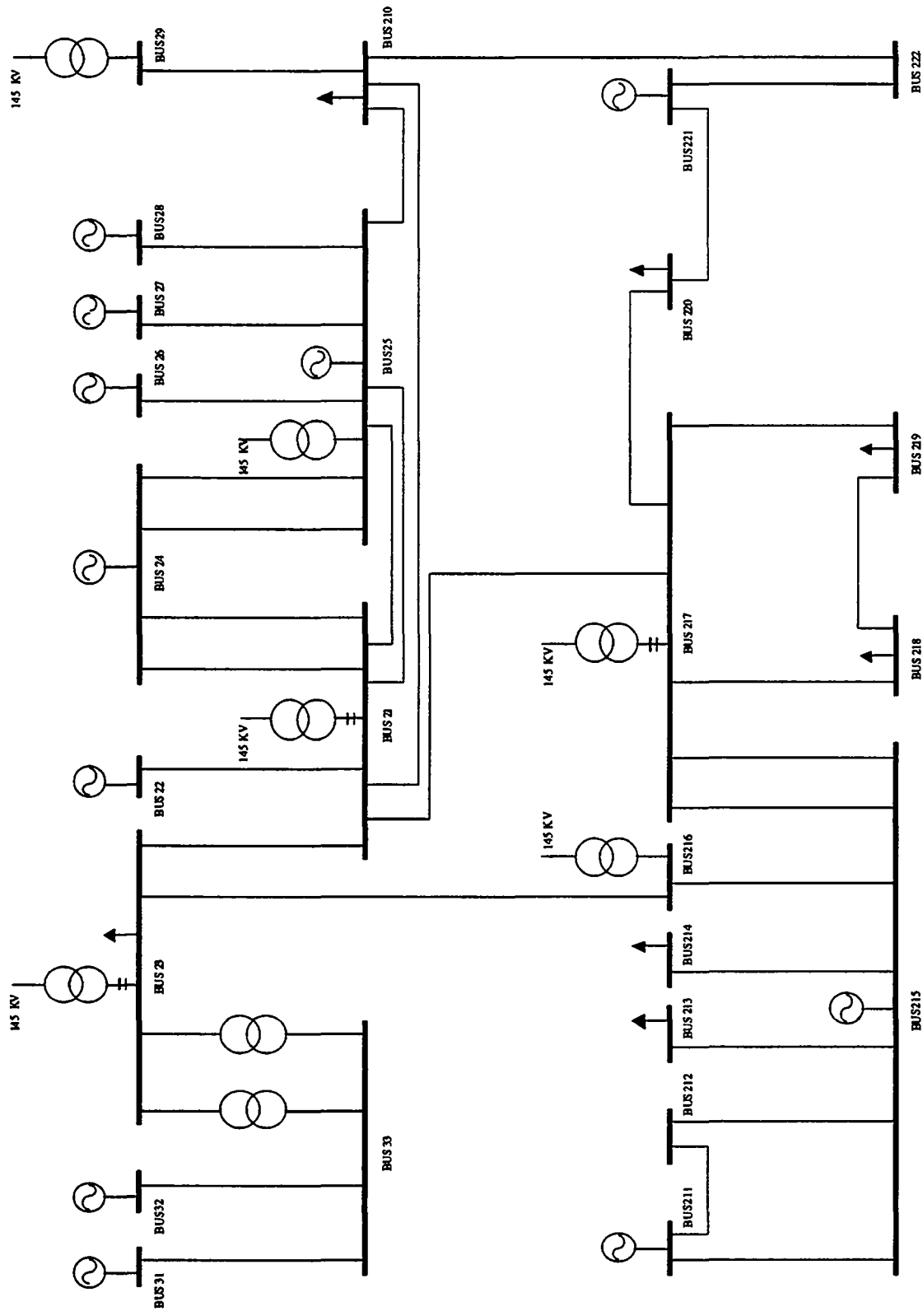


Figure D.1 : Représentation graphique du réseau électrique pour le niveau de tension 380KV - 220KV

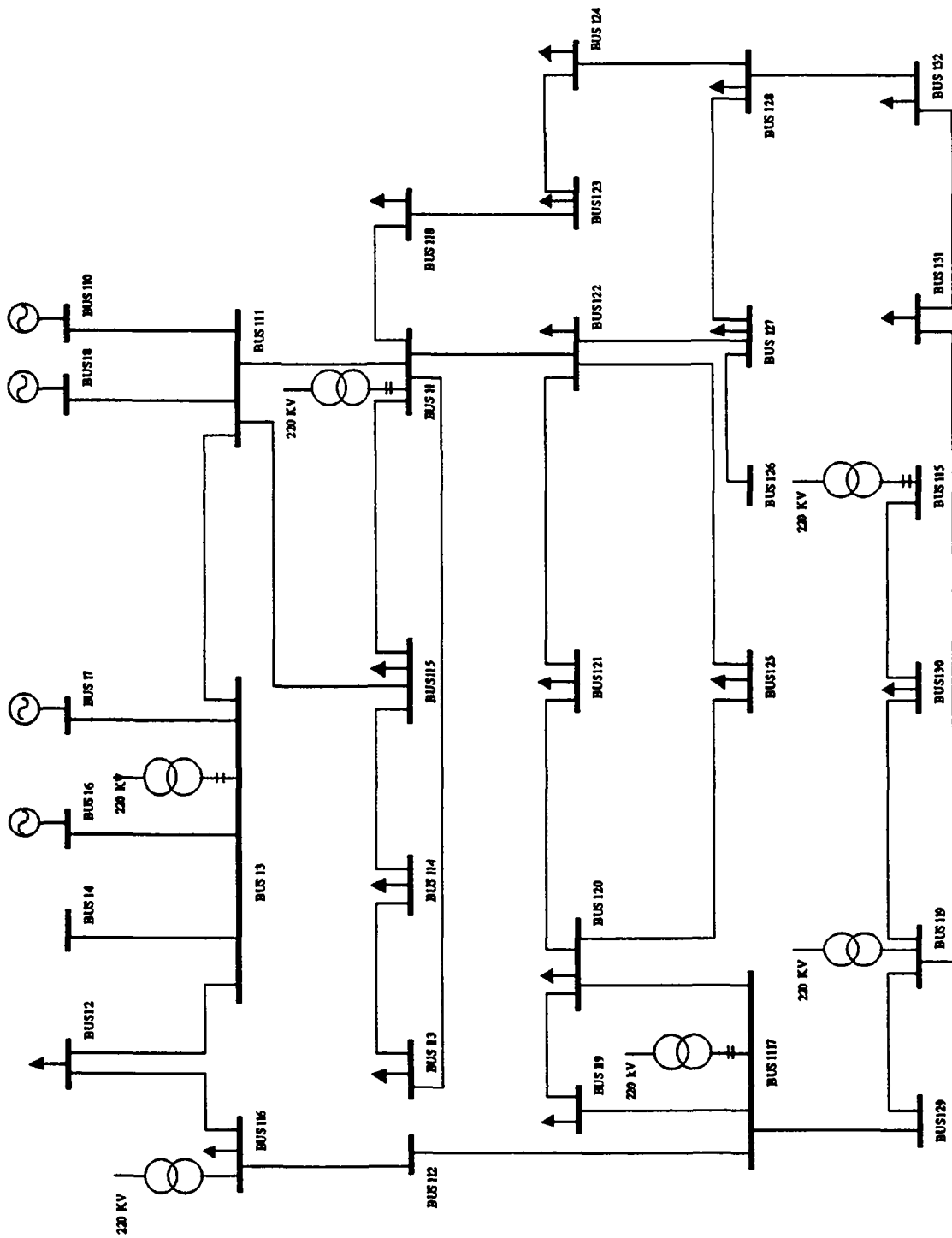


Figure D.2 : Représentation graphique du réseau électrique pour le niveau de tension 145KV

Curriculum Vitae

Christian Tinguely est de nationalité suisse, né à Fribourg le 27 juillet 1964.

Il a obtenu son certificat de maturité, type scientifique, au Collège St-Michel à Fribourg en 1984.

Il a ensuite étudié à l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne où il a obtenu un Diplôme d'Ingénieur Electricien en 1989. On lui a également décerné le prix qui récompense le meilleur projet sur les relations "Homme-Technique-Environnement".

De 1989 à 1992, il a collaboré comme assistant de recherche et d'enseignement au Laboratoire de Réseaux d'Energie Electrique où il a effectué son travail de doctorat.

Il est auteur ou coauteur des publications suivantes:

- Bart A., Tinguely C., Chamorel P.A., Germond A.J., "Algorithmic and Heuristic Method Applied to Security Analysis of Large Power Systems", Proc. of the 10th PSCC Graz Austria, pp. 840-847, 1990
- Tinguely C., Bart A., Germond A.J., "Knowledge Acquisition for Security Analysis", Proc. of the 3rd ESAP, Tokyo & Kobe, Japan, pp. 530-537, April 1991
- Tinguely C., Germond A.J., C.C. Liu, "Fuzzy Filtering for Power System Security Assessment", Proc. of the 4th ESAP, Melbourne, Australia, January 1993

