

**ÉTUDE DES OUTILS INFORMATIQUES
D'AIDE AU DIAGNOSTIC
D'APPAREILS ÉLECTRIQUES**

Benoît Tiffou
Ingénieur en électricité
diplômé de l'École Supérieure d'Électricité en 1984
(France)

Département d'informatique
de l'université McGill

Cette thèse a été présentée
à la faculté des études universitaires de second cycle
en vue d'obtenir le diplôme de maîtrise en informatique

Septembre 1989
© 1989 Benoît Tiffou

Résumé

Cet ouvrage étudie les outils informatiques d'aide au diagnostic pour l'appareillage électrique. Il couvre les méthodes conventionnelles et l'utilisation des systèmes experts qui est une approche plus adaptée.

Nous nous sommes surtout intéressés aux systèmes experts basés sur la connaissance profonde, c'est-à-dire sur la description de la structure physique et fonctionnelle des appareils. Une approche bien connue pour raisonner sur la structure de systèmes complexes consiste à utiliser les modèles qualitatifs. Nous avons donc exploré les principaux travaux de ce domaine et nous les avons appliqués au diagnostic d'appareils électriques pour en évaluer les limites. Nous avons aussi considéré une autre approche, basée sur les réseaux causaux, qui exploite une information importante en diagnostic et complémentaire à celle encodée dans les modèles qualitatifs: la causalité. La méthodologie globale du diagnostic est présentée dans chaque cas.

Abstract

This work is a study on software tools for the diagnosis of electrical equipment. It covers conventional and expert system methods, of which the latter are found to be more appropriate for the task.

The interest in expert systems is directed towards those based on deep knowledge, meaning the structural and functional description of devices. A well-known approach for reasoning on complex structural knowledge consists of using qualitative models. The thesis explores the principal works in this domain and applies them to the diagnosis of electrical equipment in order to evaluate their limitations. Another approach is also considered, based on causal networks, which exploits an important element of diagnosis and complements qualitative models: causality. Finally, a global diagnostic methodology is presented for each approach.

Remerciements

Je remercie Docteur Renato De Mori et Docteur Miguel Marin, pour leur direction et surtout pour m'avoir initié à une branche de la science que j'ai eu plaisir à étudier: l'intelligence artificielle appliquée au diagnostic.

Je remercie aussi toute l'équipe du projet PRECARN "Environnement informatique intégré et intelligent pour le développement de systèmes experts d'entretien préventif conditionnel", c'est-à-dire outre mes directeurs de thèse, Monsieur Yvan Côté, Docteur Francisco Galiana, Monsieur Jean-Louis Jasmin, Monsieur Julian Lebensold, Docteur David Lowther, Monsieur Ramesh Madhok, Monsieur Michel Simard et Monsieur Carlos Saldanha qui ont alimenté cette thèse en idées et en connaissances au travers de nos réunions.

Je suis particulièrement reconnaissant à mon cher collègue et ami Carlos Saldanha pour les discussions enrichissantes que nous avons eues et les précieux conseils qu'il m'a prodigués.

Je remercie aussi le CRIM pour son support et le cadre de travail efficace et agréable qu'il fournit.

Finalement, je voudrais adresser mes derniers remerciements mais pas les moindres, bien au contraire, à ma femme, Claire, pour les heures et la patience qu'elle a consacrées à la correction de cette thèse et aussi à ma famille et mes amis pour avoir tissé au fil des jours un climat favorable à la réalisation de cet ouvrage.

**Cette thèse est dédiée
à tous ceux qui cherchent la beauté
au fond de chaque chose**

TABLE DES MATIÈRES

1. INTRODUCTION.....	1
1.1 Contexte de la thèse	1
1.2 Objectif et contenu de la thèse.....	2
2. LE DIAGNOSTIC DANS L'INDUSTRIE.....	4
2.1 Définition du diagnostic.....	4
2.2 Le cadre du diagnostic: les programmes d'entretien.....	6
2.3 Principe général des systèmes d'entretien et de diagnostic	8
2.4 Les problèmes de l'industrie.	9
3. LES MÉTHODES CONVENTIONNELLES D'AIDE AU DIAGNOSTIC.....	11
3.1 Les arbres de défaillances.....	11
3.2 La FMEA (Failure Mode and Effects Analysis).....	12
3.3 Le diagnostic par analyse de données	13
3.4 Limitations.....	14
4. GÉNÉRALITES SUR LES SYSTÈMES EXPERTS.....	16
4.1 Avantages des systèmes experts par rapport aux méthodes conventionnelles	16
4.1.1 Le dynamisme du raisonnement.....	16
4.1.2 La représentation des connaissances.....	16
4.1.3 L'interaction dynamique avec l'utilisateur	17
4.1.4 Les mises à jour.....	18
4.2 Notions de base sur les systèmes experts.....	18
4.2.1 La partie développement du système expert	18
4.2.2 La partie utilisation du système expert.....	23
4.2.3 Comparaison des systèmes experts et des programmes algorithmiques.....	25
4.3 Les systèmes experts basés sur une connaissance de surface	27
4.4 Les systèmes experts basés sur une connaissance profonde	28
4.5 Les systèmes experts mixtes	29

5. LES SYSTÈMES EXPERTS D'AIDE AU DIAGNOSTIC D'APPAREILS	
ÉLECTRIQUES.....	30
5.1 Les systèmes experts basés sur des modèles qualitatifs.....	31
5.1.1 Intérêt des modèles qualitatifs	31
5.1.2 Principes du raisonnement qualitatif.....	32
5.1.3 Utilisation du raisonnement qualitatif pour le diagnostic.....	35
5.1.4 Trois méthodes de raisonnement qualitatif.....	36
5.1.4.1 Méthode de De Kleer et Brown: les confluences	37
5.1.4.2 Méthode de Forbus: les processus qualitatifs.....	40
5.1.4.3 Méthode de Kuipers: les réseaux de contraintes qualitatives.....	45
5.1.5 Limitations de l'application des modèles qualitatifs au diagnostic	
d'appareils électriques.....	61
5.1.5.1 Ambiguïtés des résultats.....	61
5.1.5.2 Génération des hypothèses.....	62
5.1.5.3 Discrimination des candidats.....	63
5.1.5.4 Complexité de la simulation.....	63
5.2 Les systèmes experts basés sur les réseaux causaux	64
5.2.1 Intérêt des réseaux causaux.....	64
5.2.2 Description des réseaux causaux.....	65
5.2.3 Utilisation des réseaux causaux en diagnostic.....	67
5.2.4 Acquisition des réseaux causaux.....	71
5.2.5 Exemple d'utilisation des réseaux causaux au diagnostic d'appareil	
électrique.....	73
5.2.6 Comparaison des réseaux causaux et des modèles qualitatifs	81
5.2.7 Généralisation de l'application des réseaux causaux	83
6. CONCLUSION	84
6.1 Récapitulation	84
6.2 Contributions de la thèse.....	86
6.3 Orientations futures.....	87
BIBLIOGRAPHIE	90
1. Références figurant dans la thèse	90
2. Références complémentaires	93
ANNEXE.....	98

TABLE DES FIGURES ET DES TABLEAUX

Figure 2.1	Schéma général d'entretien et de diagnostic8
Figure 3.1	Arbre de défaillances partiel d'un baladeur11
Tableau 3.1	Tableau partiel de la FMEA d'un baladeur.....13
Figure 4.1	Architecture générale des systèmes experts.....19
Figure 4.2	Exemple de réseau sémantique22
Figure 4.3	Comparaison entre l'exécution de programmes algorithmiques et de systèmes experts.....26
Tableaux 5.1 a) et b)	Exemples d'algèbre qualitative33
Tableau 5.2	Table de transitions pour l'évolution de variables.....34
Figure 5.1	Méthodologie du diagnostic basé sur les modèles qualitatifs.....35
Figure 5.2	Schéma du transformateur38
Figure 5.3	Représentation du parafoudre41
Figure 5.4	Schématisation du parafoudre42
Figure 5.5	Réseau de contraintes de la partie thermique du transformateur46
Figures 5.6 a) à l)	Résultats de la simulation du comportement thermique du transformateur.....48 à 59
Figure 5.7	Réseau causal d'un système d'éclairage simple66
Figure 5.8	Méthodologie du diagnostic à l'aide de réseaux causaux.....67
Figure 5.9	Règles de simplification de réseaux causaux74
Figure 5.10	Réseau sémantique du transformateur.....75
Figure 5.11	Réseau causal complet suivant le découpage de la structure physique77
Figure 5.12	Réseau causal complet après fusionnement des paramètres78
Figure 5.13	Réseau causal simplifié.....79
Figure 5.14	Utilisation du réseau causal dans le cas d'un déclenchement différentiel80

1. INTRODUCTION

1.1 Contexte de la thèse

Le travail présenté dans cette thèse a été mené dans le cadre d'un projet conjoint entre le CRIM, Hydro-Québec et ALCAN. Ce projet vise à développer un environnement informatique intégré et intelligent pour le développement de systèmes d'entretien préventif conditionnel.

Il est nécessaire de présenter l'historique de ce projet pour expliquer les origines de la présente thèse. Hydro-Québec a développé dans la première partie de l'année 1988 un démonstrateur de systèmes experts pour le diagnostic de transformateurs, SEDA-TRANSFO [Marin et Jasmin, 1989a], qui a suscité un grand intérêt dans l'entreprise. Hydro-Québec en réalisant que les bénéfices découlant de l'application des systèmes experts de diagnostic aux transformateurs seraient substantiels a voulu généraliser leur application à d'autres appareils électriques. Hydro-Québec s'est donc associé au CRIM pour représenter la connaissance relative à l'équipement électrique pour développer de façon cohérente et normalisée les différents systèmes experts de diagnostic. La représentation de la connaissance étant dépendante de l'application traitée, l'étude devait aussi porter sur les méthodes de diagnostic. C'est par la suite qu'ALCAN s'est associé à ce projet et que le sujet a été élargi pour couvrir l'entretien.

Cette thèse découle de cette direction de recherche initiale et s'intègre dans la nouvelle orientation du projet puisque le diagnostic est un volet de l'entretien.

Le coût annuel de maintenance et de réparations se chiffrent en millions de dollars pour des entreprises telles qu'Hydro-Québec et ALCAN et les interruptions causées par des pannes d'appareils tels que les transformateurs de grande puissance sont associées à des coûts directs et indirects très élevés. La motivation de l'industrie est donc très forte pour développer des outils d'aide au diagnostic qui diminueraient les temps de réparations et donc de retraits des appareils.

1.2 Objectif et contenu de la thèse

Cette thèse tente de répondre à ce besoin de l'industrie électrique en étudiant justement les outils informatiques d'aide au diagnostic d'appareils électriques.

Le problème du diagnostic n'est pas nouveau. Gondran [Gondran, 1986] relate l'existence du papyrus Edwin Smith, daté du XVII^e siècle avant Jésus Christ et qui serait une copie d'un texte de l'Ancien Empire Égyptien du début du troisième millénaire, qui formalise des connaissances médicales sur le diagnostic de blessures à la tête. Depuis, l'industrie a tenté de développer des méthodes de diagnostic et d'y adapter les techniques les plus modernes.

Chatain et Dussauchoy [Chatain et Dussauchoy, 1987] se sont intéressés au problème du diagnostic dans l'industrie et nous nous sommes inspirés de leur ouvrage dans les deux premiers chapitres pour présenter l'état des connaissances dans ce domaine.

Nous présenterons tout d'abord le problème général du diagnostic dans l'industrie. La définition du diagnostic sera précisée ainsi que l'environnement dans lequel cette tâche s'intègre. Nous verrons pour quelles raisons l'industrie cherche à recourir à des outils informatiques d'aide au diagnostic. Cet aspect fera l'objet du deuxième chapitre.

Depuis que l'utilisation des ordinateurs s'est répandue dans les industries, de nombreux travaux ont été menés pour tenter de les appliquer au diagnostic. Ceux-ci ont débouché sur plusieurs méthodes dont certaines sont dites conventionnelles en raison du temps depuis lequel elles sont connues et de la programmation algorithmique sur lesquelles elles reposent. Dans le troisième chapitre, nous présenterons ces méthodes conventionnelles ainsi que leurs insuffisances.

Le récent essor de l'intelligence artificielle et plus précisément des systèmes experts offre une alternative aux méthodes conventionnelles. Le quatrième chapitre présente en quoi l'approche par les systèmes experts est intéressante par rapport aux autres méthodes et explique dans les grandes lignes leur architecture et leurs principes de fonctionnement. Parmi les systèmes experts nous distinguerons ceux basés sur une connaissance de surface, ou encore heuristique, ceux basés sur une connaissance profonde, c'est-à-dire exprimant la structure du système, et ceux qui reposent sur les deux approches précédentes à la fois.

Les systèmes experts basés sur la connaissance de surface constituent une technologie déjà bien connue qui a été appliquée avec succès au diagnostic de l'appareillage électrique [Marin et Jasmin, 1989a] [Riese, 1985]. Notre étude ne s'y est donc pas attardée et s'est plutôt intéressée aux systèmes experts basés sur la connaissance profonde qui en sont à un stade encore expérimental. Les contributions apportées à ces systèmes experts se répercuteraient directement sur ceux qui utilisent les deux types de connaissances à la fois puisqu'ils combinent leurs avantages. Le cinquième chapitre se concentre par conséquent sur l'étude des systèmes experts basés sur la connaissance profonde.

Dans la littérature, la façon la plus répandue de traiter le diagnostic de systèmes complexes par la connaissance profonde repose sur l'utilisation des modèles qualitatifs. La première section du cinquième chapitre est consacré uniquement à leur étude. Dans un premier temps, nous présenterons ce que sont les modèles qualitatifs, la méthodologie du diagnostic qui les utilise; puis nous reprendrons les principaux travaux sur les modèles qualitatifs pour les appliquer au diagnostic d'appareils électriques afin d'évaluer cette approche et d'en révéler les limitations.

La deuxième section du cinquième chapitre traitera d'une autre approche basée sur les réseaux causaux. Celle-ci exploite la notion de causalité qui est complémentaire de l'information encodée dans les modèles qualitatifs. Nous verrons en quoi consistent les réseaux causaux, quelle est la méthodologie du diagnostic qui leur est associée, comment on peut acquérir les réseaux causaux pour s'assurer qu'ils reflètent les mécanismes d'un système et nous les appliquerons à l'exemple du transformateur. Nous en déduirons finalement quel intérêt ils présentent par rapport aux modèles qualitatifs.

En conclusion, nous soulignerons les contributions de cette thèse à l'état des connaissances sur le diagnostic d'appareils électriques et présenterons les orientations futures envisagées pour ce travail. Ainsi nous aurons réalisé notre étude des outils informatiques d'aide au diagnostic d'appareils électriques.

2. LE DIAGNOSTIC DANS L'INDUSTRIE

2.1 Définition du diagnostic

Le diagnostic est un terme qui a pris plusieurs sens dans la littérature et dans l'industrie. Au sens large, le diagnostic est synonyme d'analyse sans faire allusion aux raisons qui la provoquent. Autrement dit, il est possible de diagnostiquer un système qui fonctionne bien.

Dans un sens plus restreint mais qui rejoint davantage le sens commun conféré à ce terme, le diagnostic est rattaché au concept de panne [Storr et al., 1988]. Dès lors, il devient nécessaire de définir aussi la notion de panne.

D'une façon générale, une panne est la manifestation d'un comportement anormal dans un système. Ce comportement anormal peut aller de l'arrêt complet du système, comme c'est le cas pour une génératrice, ou de son incapacité de fonctionner, comme c'est le cas pour un disjoncteur, jusqu'à des symptômes qui n'altèrent pas l'opération du système mais qui sont tout de même des signes de faiblesses d'une de ses parties. Par exemple, un bruit de cliquetis dans une voiture ne l'empêche pas de rouler mais peut provoquer une inquiétude et une révision dans un garage.

Si nous tentons de définir le concept de panne de façon un peu plus formelle, il faut commencer par décrire un système par un ensemble de paramètres mesurables. Son fonctionnement normal est alors caractérisé par le fait que chaque paramètre respecte un ensemble de contraintes. Ici, nous entendons par contraintes des équations ou des inéquations portant sur un ou plusieurs paramètres. Les valeurs des paramètres peuvent être numériques ou symboliques et le type des contraintes peut être quantitatif ou qualitatif. Ce choix repose sur la nature des paramètres, la valeur de la couleur d'un composant sera symbolique, et tente de simplifier autant que possible l'espace des valeurs, dans la mesure où l'information utile n'est pas perdue, de façon à accélérer les calculs et rendre les résultats plus expressifs. Ainsi, on s'attachera seulement à la zone de valeur d'un paramètre et à son sens de variation quand cela est suffisant.

Par exemple, le fonctionnement normal d'un rond chauffant de cuisinière électrique pourra être exprimé de la façon suivante:

- Si, lorsque la cuisinière est branchée et que le bouton de réglage du rond est mis sur MAX, il devient rouge dans les 15 à 30 secondes
- Si, lorsque la cuisinière est branchée et que le bouton de réglage du rond est à une certaine valeur, la quantité de chaleur qu'il dégage correspond à l'ordre de grandeur attendu

Dès lors, une panne se traduit par la violation d'une contrainte caractérisant le bon fonctionnement d'un système. Il peut s'agir de la simple déviation d'un paramètre par rapport à son intervalle admis ou de la violation d'une équation liant plusieurs paramètres. Une panne peut être une manifestation discontinue, comme c'est le cas pour un bris, ou continue, comme c'est le cas pour une dégradation progressive.

Autrement dit, une panne est détectée lorsque le comportement du système observé ne correspond pas à celui qui est prédit par son modèle, formé de l'ensemble des contraintes caractérisant son fonctionnement normal. Cela peut être dû à une erreur de modélisation mais cette hypothèse sera tout d'abord écartée, ce n'est que si l'analyse de la situation conduit à une impasse qu'elle sera considérée.

Dans le cas de circuits logiques, la concordance entre les sorties du système réel et du modèle se vérifie par simple comparaison. Par contre, pour des systèmes physiques obéissant à des lois naturelles, ces sorties ne coïncident pas parfaitement et il faut établir des marges de tolérance. Ces marges vont déterminer la granularité du modèle. En effet, plus les marges seront faibles, plus le modèle devra être précis. La granularité exprime le niveau de détail de la description d'un système, c'est-à-dire quels composants et lois naturelles sont modélisés, quels paramètres significatifs sont utilisés et quelle précision dans l'expression de ces lois est adoptée. La granularité doit être suffisante pour détecter les pannes mais ne doit pas être trop poussée d'un autre côté pour éviter que le modèle soit trop complexe, ce qui rendrait sa création et son utilisation trop lourde.

Le diagnostic peut être défini comme l'acte d'expliquer une panne observée. Cela consiste à localiser son origine. Le diagnostic est un raisonnement qui infère les raisons possibles de l'observation, suggère des actions pour sélectionner lesquelles de ces raisons sont valables et recommence ce processus sur les raisons retenues jusqu'à ce qu'une raison

ultime soit trouvée. Nous garderons cette définition du diagnostic pour le cadre de cette thèse.

Le diagnostic est un acte intelligent car il nécessite l'utilisation de l'expérience acquise si elle existe, un raisonnement éventuel sur la structure du système, d'un enchaînement des déductions et des inductions du raisonnement et la synthèse d'une information volumineuse et diversifiée. Pour optimiser le diagnostic, il faut accorder des priorités aux différentes possibilités qui se présentent lors de l'analyse afin de sélectionner celle qui retiendra d'abord l'attention. Cela exige parfois que l'on considère de nombreux critères dont l'importance relative est difficile à quantifier. L'esprit humain face à ce problème fait usage de bon sens, résultant de l'expertise, et d'intuition pour le résoudre.

2.2 Le cadre du diagnostic: les programmes d'entretien

Les pannes entraînent des coûts directs ou indirects que les industries cherchent à minimiser. Les coûts directs sont ceux de la réparation et de la perte équivalant à ce que le système aurait pu produire pendant son temps d'interruption. Les coûts indirects sont le mécontentement d'une clientèle, une baisse de l'image de marque, une perte de confiance de la part du public qui ont des répercussions ultérieures sur l'activité de la compagnie.

Dans l'objectif de minimiser les pertes causées par les pannes, les entreprises ont recours à des programmes d'entretien ou de maintenance. Ces programmes visent à réduire les coûts de réparation ou à diminuer le nombre des pannes. La réduction des coûts de réparation s'obtient en préparant les différents scénarios de pannes et la réduction des pannes en s'assurant que l'équipement est en bon état. Pour réaliser ce dernier point, il faut parfois inspecter le matériel et changer ou remettre en état les parties qui présentent des faiblesses.

Trois philosophies d'entretien sont connues: l'entretien correctif, l'entretien préventif et l'entretien préventif conditionnel¹. L'entretien correctif consiste à ne s'occuper du matériel que lorsque qu'il tombe en panne. L'entretien préventif recommande des

¹ L'entretien préventif conditionnel est aussi connu sous le nom d'entretien prévisionnel ("forecast maintenance" ou "predictive maintenance" en anglais).

inspections du matériel à intervalles réguliers. Quant à l'entretien préventif conditionnel, son objectif est de recommander de ne faire des inspections qu'aux moments propices, c'est-à-dire juste avant qu'une panne ne se produise. Cela peut s'obtenir par une surveillance continue en repérant les signes d'une panne imminente ou par prédictions en se basant sur une analyse des statistiques de pannes, des modèles de fiabilité, de l'historique, des conditions d'opération et éventuellement d'un modèle de vieillissement.

L'adoption de l'une ou l'autre de ces philosophies d'entretien se base sur quelques critères. Tout d'abord, les inspections pour prévenir les pannes représentent un coût et si elles sont trop fréquentes, elles peuvent conduire à des coûts d'entretien supérieurs à ceux qui auraient été obtenus sans inspection. Il faut donc comparer les différents programmes et choisir celui qui semble le plus économique. Cette étude est dépendante de l'équipement considéré, il se peut qu'un type d'entretien convienne à un appareil mais non pas à un autre. Les entretiens préventif et préventif conditionnel font appel à une connaissance scientifique et ils ne peuvent être considérés que si la compagnie la possède, ce qui explique pourquoi l'entretien correctif est si répandu.

Le diagnostic est un acte qui s'intègre dans les programmes d'entretien. En effet, il sert à déceler la source de la panne dans la tâche de réparation et conduit par conséquent à déterminer les actions à prendre. D'autre part, les faiblesses étant des pannes en voie de se produire, le diagnostic sert donc de la même façon dans la tâche de réduction de pannes.

2.3 Principe général des systèmes d'entretien et de diagnostic

Le schéma général d'entretien et de diagnostic d'équipement est présenté à la figure 2.1.

Le système est soumis à une surveillance. Il peut s'agir d'une surveillance continue où certains paramètres sont constamment examinés, d'une surveillance par inspections échelonnées dans le temps, de la comparaison entre la sortie d'un modèle et le comportement réel ou encore d'une surveillance discrète, c'est-à-dire que dès qu'un phénomène anormal est enregistré par un capteur, une alarme se déclenche.

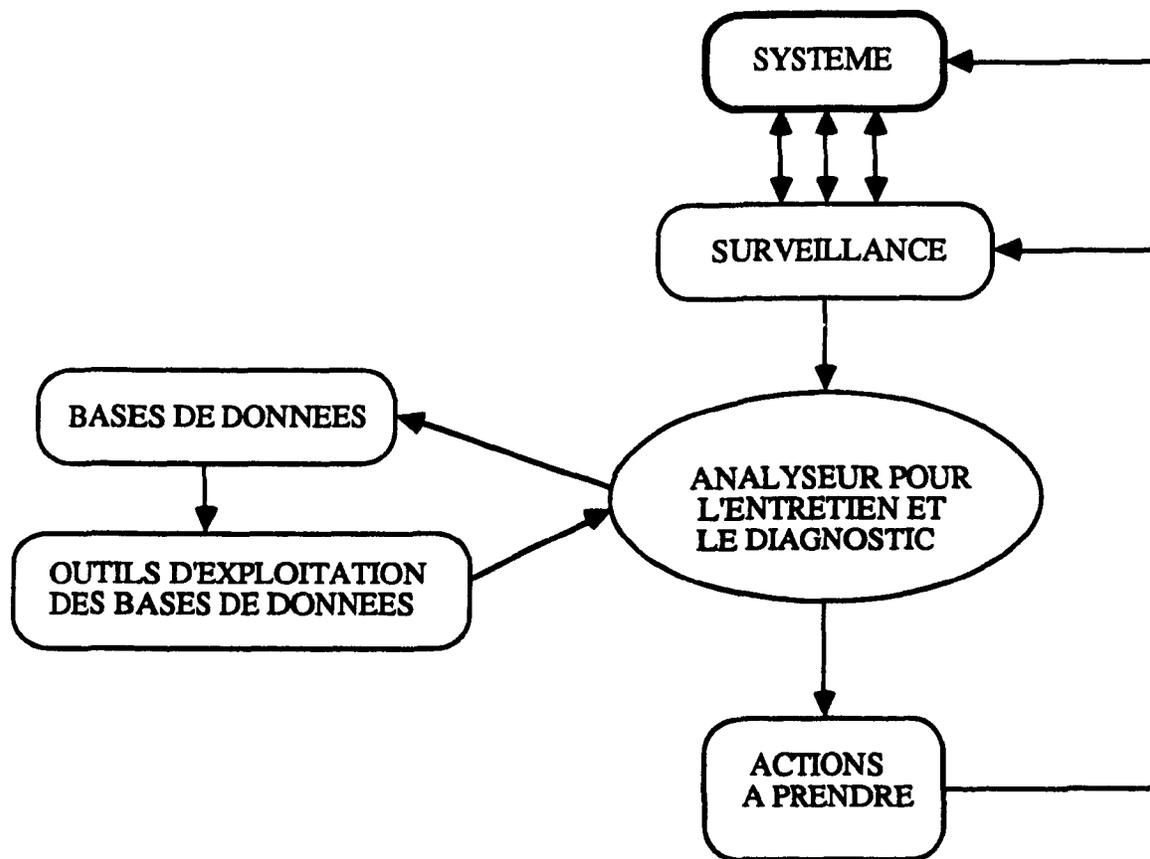


Figure 2.1 Schéma général d'entretien et de diagnostic

Le bloc surveillance renvoie l'information concernant l'appareil à l'analyseur pour l'entretien et le diagnostic. Dès qu'une anomalie est repérée, elle est diagnostiquée. Le raisonnement tenu sera basé sur une connaissance de l'opération de l'appareil, la similarité de la situation avec une précédente, l'exploitation de données statistiques et la connaissance de la structure de l'appareil. L'analyse se terminera par un verdict qui est une décision sur l'opération du système. Des exemples de verdict sont: retrait de l'appareil, opération en charge réduite et opération normale. On pourra aussi soupçonner que le système de surveillance est responsable de l'anomalie dans le cas où le système fonctionne correctement et les conditions d'opération sont normales ou encore s'il existe des présomptions contre lui.

Les bases de données enregistrent diverses informations, telles que la description des événements, des actions prises, des conclusions sur l'évènement. Les bases de données sont systématiquement mises à jour quand un évènement se produit.

Les outils d'exploitation de données servent à synthétiser l'information des bases de données car l'information brute des bases de données est souvent trop volumineuse et trop décomposée pour être directement utilisable pour le diagnostic. Ces outils peuvent servir éventuellement à corréler, en se basant sur des statistiques, la situation observée et l'état du système. D'autres renseignent sur la disponibilité des équipes de réparation pour planifier les actions d'entretien ou permettent d'évaluer les bénéfices de l'entretien.

Le diagnostic va conduire à la recommandation d'actions à prendre. Éventuellement, ces actions seront évaluées en termes de coûts et de bénéfices et l'analyse conclura s'il y a lieu ou non de les exécuter. L'analyseur enregistrera les informations significatives, telles que le verdict du diagnostic, dans les bases de données.

L'opérateur exécute soit des actions d'entretien, ce qui modifie l'appareil et le ramène à un état normal ou du moins momentanément satisfaisant, soit des actions d'inspection pour fournir à l'analyse l'information nécessaire pour qu'elle puisse se poursuivre.

2.4 Les problèmes de l'industrie

L'industrie fait face à plusieurs problèmes pour réaliser ses programmes d'entretien. Tout d'abord, l'expertise est répartie entre plusieurs experts. En principe, la connaissance d'un expert complète celle des autres. Parce que les experts ont des tâches réparties, ils sont rarement consultés conjointement dans les problèmes de la vie réelle. L'expertise disponible pour faire face à une situation est donc souvent partielle et peut s'avérer être insuffisante dans certains cas de pannes qui auraient pu être résolus avec la somme de toutes les expertises.

La perte d'expertise est un autre souci des industries. Lorsqu'un expert quitte une compagnie, il emporte avec lui une connaissance précieuse. Cette connaissance est alors perdue pour la compagnie ou elle se raréfie.

L'expertise s'acquiert par une formation académique de base, des expériences vécues sur le terrain, des dialogues avec des collègues. Ce processus d'apprentissage est d'autant plus long que les systèmes à entretenir sont complexes et se complexifient avec les progrès technologiques et qu'il s'effectue par confrontation à des situations nouvelles dans la pratique. Les personnes hautement qualifiées ne sont pas toujours disponibles pour entraîner une nouvelle génération et les aider dans leur pratique. La transmission d'expertise à la relève est donc un problème qui touche l'industrie.

La dispersion des experts est aussi un fait dont les industries pâtissent. Quand une panne peu fréquente et grave survient dans un site où l'expert qui pourrait prendre les bonnes décisions n'est pas là, ses conséquences peuvent prendre des proportions néfastes. Les experts sont souvent rares par rapport au nombre de sites de la compagnie. De plus, les sites sont parfois très éloignés, les horaires de travail des experts ne couvrent pas toute la plage d'opération des systèmes et il arrive que l'expert soit débordé par d'autres problèmes aussi, sinon plus urgents.

En résumé, la centralisation, la conservation, la transmission et la disponibilité de l'expertise au sein d'une compagnie sont des points essentiels qui conditionnent son développement. Toute contribution pour améliorer ces aspects peut entraîner des bénéfices appréciables et suscitent donc un fort intérêt dans l'industrie.

3. LES MÉTHODES CONVENTIONNELLES D'AIDE AU DIAGNOSTIC

3.1 Les arbres de défaillances

Les arbres de défaillances [Henley et Kumamoto, 1981] sont très répandus en diagnostic industriel. Les défaillances, ou les fautes, d'un système sont les nœuds de l'arbre et les branches lient les fautes à leurs subséquentes. Les pannes situées dans le haut de l'arbre (près de la racine) sont associées au système entier ou à ses parties principales tandis que celles situées au bas le sont à des parties ou composants élémentaires.

Deux types de branches existent: les branches ET et OU. Prenons comme exemple l'arbre de défaillances simplifié pour un baladeur (walkman). La figure 3.1 représente une partie de cet arbre pour le cas où une absence de son est observée alors que la touche "Marche" est enfoncée.

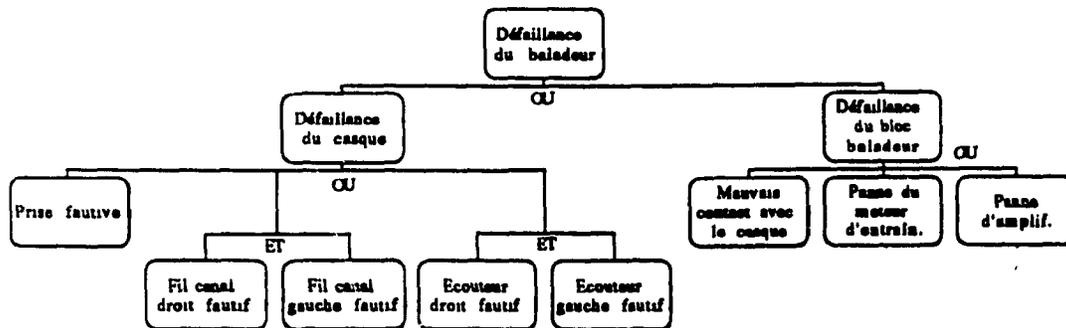


Figure 3.1 Arbre de défaillances partiel d'un baladeur

La racine est la panne du baladeur lui-même. Celle-ci se décompose en deux cas possibles: défaillance du casque ou du bloc baladeur. Chacune de ces pannes se décompose à leur tour en plusieurs possibilités, comme le montre la figure 3.1. En général les branches sont du type OU mais parfois certaines branches indiquent que des pannes subséquentes

doivent être présentes pour expliquer la panne initiale et alors une branche du type ET est nécessaire.

À chaque niveau, une série de tests rattachés à chaque panne est proposée pour déterminer la faute suivante à considérer. Un diagnostic se termine quand une feuille de l'arbre de défaillances est atteinte. En effet, le diagnostic consiste à rechercher les pannes élémentaires qui expliquent le comportement anormal du système et une panne élémentaire est par définition une panne qui ne peut pas être décomposée. Elle se situe donc au bas de l'arbre de défaillances.

D'autres informations utiles, telles que les réparations et les contrôles à effectuer, sont aussi associées en général aux fautes. Le détail sur la façon de réaliser la réparation et ensuite la vérification du bon fonctionnement est fourni pour guider les utilisateurs, même débutants, dans leur travail.

Cette méthode est déductive car elle part de l'observation de la panne à un niveau général et à chaque étape de l'arbre sont déduites, suite aux tests, les causes possibles.

3.2 La FMEA (Failure Mode and Effects Analysis)

La FMEA [Henley et Kumamoto, 1981] consiste à décomposer un système en composants élémentaires et d'énumérer pour chacun les modes de défaillances, leur causes possibles et leurs effets sur le système. Nous montrons dans le tableau 3.1 la FMEA partielle pour l'exemple du baladeur précédemment examiné.

Quand une panne apparaît, on se reporte dans le tableau au niveau du composant impliqué. Si la cause renvoie à un autre composant, alors on répète le processus jusqu'à ce qu'une cause élémentaire soit décelée.

La FMEA permet de conduire une analyse préliminaire des pannes possibles. Grâce à la colonne sur les effets de la panne d'un composant sur le système, les défaillances du système peuvent être préalablement envisagées. La FMEA est donc une méthode inductive puisque qu'elle permet d'envisager les pannes d'un système à partir de la défaillance de ses composants.

COMPOSANTS	MODES DE DEFAILLANCE	CAUSES POSSIBLES	EFFETS SUR LE SYSTEME
Baladeur	Absence de son	Casque défectueux	
		Bloc défectueux	
	Son dans un seul canal	...	
	Bruit dans le son	...	
	Distorsion du son	...	
Moteur d'entraînement	Bris	Courroie d'entraînement	Absence de son
	Ralentissement	Piles usées	Son déformé
...			

Tableau 3.1 Tableau partiel de la FMEA d'un baladeur

3.3 Le diagnostic par analyse de données

Les méthodes d'analyses de données [Pau, 1975] permettent de mettre en évidence des relations de causalité des systèmes. À partir d'une banque de cas, les corrélations entre des grandeurs indépendantes sont déduites et les importances relatives des facteurs peuvent être quantifiées.

Cette approche conduit au diagnostic par reconnaissance des formes. Le vecteur des paramètres observables est associé à une faute du système. Cette méthode est probabiliste, contrairement au deux précédentes qui sont déterministes. L'avantage est que l'attention se focalise immédiatement sur la cause probable de la panne.

3.4 Limitations

Les approches par arbre de défaillances et par FMEA sont lourdes à développer pour des systèmes complexes [Chatain et Dussauchoy, 1987]. Il faut des ressources considérables pour recueillir l'information et la mettre en forme.

Il est nécessaire de disposer d'un historique complet ou d'une grande banque de cas pour couvrir les différentes pannes et les relations entre pannes. Cela est d'autant plus vrai pour la méthode d'analyse de données où la fiabilité des corrélations dépend non seulement de la faible variance des cas mais aussi de leur nombre.

Les mises à jour sont lourdes à effectuer. Quant une nouvelle panne ou un nouveau mode de défaillance est rajouté à un arbre de défaillances ou une FMEA, il faut localiser son intégration et établir les rapports avec les autres éléments. Pour l'analyse de données, les conclusions étant tirées après compilation d'une large banque de données, cette méthode est d'autant plus difficile à mettre à jour.

Finalement, la limitation la plus importante de ces méthodes est la rigidité qu'elles imposent au raisonnement qui se base uniquement sur celles-ci. En effet, le raisonnement est aiguillé automatiquement à travers les relations causales prédéterminées. Cela est d'autant plus vrai pour le diagnostic à partir de la reconnaissance des formes où la relation entre la situation et les conclusions sur sa cause sont directes.

La démarche suivie par l'expert diffère fondamentalement de ces méthodes. D'abord son expérience lui indique les causes probables des observations et lui permet d'optimiser le nombre d'étapes à suivre pour arriver au résultat. Il réalise des inférences grâce à une connaissance qualitative du fonctionnement du système. Puis il a la faculté de pouvoir traiter de nouvelles pannes. Dans ce dernier cas, il fait usage à la fois d'analyse rationnelle mais aussi d'intuition. Les méthodes présentées ont l'avantage de représenter une connaissance encyclopédique sur les pannes. Néanmoins leur efficacité pour le diagnostic est bien inférieure à celle de l'homme.

L'informatisation de ces méthodes d'aide au diagnostic était importante pour d'une part accélérer le temps de traitement et d'autre part éviter la lourdeur de la gestion des

connaissances à partir de manuels. Avant les récents développements de l'intelligence artificielle, les outils de l'informatique classique ne permettaient de traiter que des problèmes de nature algorithmique. Ceci explique pourquoi ces méthodes étaient astreintes à une démarche séquentielle. Cependant, la nature intuitive et extrêmement associative du raisonnement humain rend ces moyens mal adaptés à une automatisation efficace du diagnostic.

4. GÉNÉRALITES SUR LES SYSTÈMES EXPERTS

Les récentes progressions de l'intelligence artificielle avec les systèmes experts fournissent une alternative commode aux méthodes conventionnelles d'aide au diagnostic. L'objectif de ce chapitre est de présenter cette nouvelle technologie. Mais auparavant nous justifierons l'intérêt que nous y portons en exposant les avantages de cette approche par rapport aux autres qui ont été citées au chapitre précédent.

4.1 Avantages des systèmes experts par rapport aux méthodes conventionnelles

4.1.1 Le dynamisme du raisonnement

Les systèmes experts ont des mécanismes de raisonnement qui se rapprochent beaucoup plus de ceux de l'homme que les systèmes mettant en œuvre les méthodes conventionnelles. Comme nous l'avons déjà exprimé précédemment, l'approche des méthodes conventionnelles est algorithmique. Cela impose que l'enchaînement du raisonnement doit s'inscrire dans un tissu de relations préalablement structuré, c'est-à-dire qu'il est statique. Le raisonnement humain utilise effectivement des relations liant des situations à des conclusions mais leur enchaînement est déterminé en fonction de l'évolution de la situation. Il est donc dynamique. Or les systèmes experts autorisent à reproduire le dynamisme du raisonnement. Nous verrons comment ils y parviennent au chapitre suivant.

4.1.2 La représentation des connaissances

Le raisonnement humain s'appuie sur une représentation du monde qui est faite d'éléments et de relations entre ces éléments. Les éléments, ou symboles, sont des objets ou des concepts. Une bicyclette, la gravitation terrestre, la philosophie, le langage sont des exemples de symboles. Un symbole est caractérisé par un ensemble d'attributs et par des relations avec d'autres symboles. Le monde tel que nous nous le représentons est un ensemble de symboles dont les rapports évoluent. Depuis ses débuts, l'intelligence

artificielle s'est efforcée de comprendre davantage comment l'homme se représente le monde [Brachman, 1979]. Les systèmes experts tentent de représenter le monde à la façon de l'homme en utilisant une approche symbolique à l'aide de réseaux sémantiques, alors que les méthodes conventionnelles n'utilisent que des paramètres ou variables sans se préoccuper de leur sémantique. Comme la puissance du raisonnement est liée à la représentation du monde, les systèmes experts présentent sur ce point un avantage par rapport aux méthodes conventionnelles.

4.1.3 L'interaction dynamique avec l'utilisateur

Une caractéristique des raisonnements intelligents est de pouvoir expliquer leurs résultats. Cela consiste non seulement à retracer les étapes du raisonnement, c'est-à-dire à donner l'enchaînement des relations suivies, mais en plus à justifier à chaque étape ce qui a motivé les choix des enchaînements. Les systèmes experts fournissent de telles explications. Ils sont aussi capables de justifier pourquoi une relation n'a pas été suivie si l'utilisateur le leur demande. Les méthodes conventionnelles autorisent aussi à retracer l'enchaînement de relations suivi mais n'offrent pas les mêmes facilités d'interaction avec l'utilisateur pour la justification du raisonnement.

Durant l'exécution du diagnostic, le système expert accepte que l'utilisateur rentre de nouvelles données qui n'ont pas été demandées par le système. Celles-ci sont alors rajoutées aux connaissances précédentes et le raisonnement se poursuit avec l'information augmentée. Le système expert est donc esclave de l'information que lui communique l'utilisateur. Dans les méthodes conventionnelles, le raisonnement devant suivre un chemin continu dans un arbre de possibilités, l'expert ne peut fournir que les informations attendues par le système. Si ce n'est pas le cas, la nouvelle information fournie au système va repositionner le raisonnement à un autre endroit dans l'arbre des possibilités mais alors, l'information précédente n'est plus utilisée. Dans l'utilisation des méthodes conventionnelles, l'usager est esclave alors que l'inverse est souhaitable.

4.1.4 Les mises à jour

Nous avons mentionné auparavant la lourdeur des mises à jour pour les systèmes basés sur des méthodes conventionnelles. Celles-ci sont dues au fait qu'il faille localiser les insertions ou les retraits et gérer tous les liens avec le reste des connaissances. Ou encore dans le cas de l'analyse de données, il faut recompiler la banque de données. Pour les systèmes experts, les mises à jour des relations liant les situations sont facilitées par le fait que l'enchaînement des relations est décidé lors de l'exécution par un moteur d'inférence. Ces mises à jour consistent simplement à décrire une nouvelle relation et à la rajouter à la base de connaissances.

4.2 Notions de base sur les systèmes experts

Les systèmes experts sont des programmes intelligents qui ont la faculté de reproduire des raisonnements de l'homme. Leur intelligence repose sur la façon dont les connaissances sont représentées et utilisées. Leur structure générale est présentée à la figure 4.1 inspirée de Parsaye et Chignell [Parsaye,Chignell 1988].

Un système expert connaît deux phases: son développement et son utilisation. Dans un premier temps, le système expert reçoit les connaissances sur l'application qu'il va traiter et ensuite s'en servira pour résoudre les problèmes qu'on lui soumettra. Nous présentons ci-après les éléments intervenant dans les deux phases.

4.2.1 La partie développement du système expert

Ici, le développement désigne l'initialisation, pendant laquelle les premières connaissances sont rentrées, la mise au point, où les erreurs de jeunesse du système sont corrigées, et la mise à jour, qui complète et corrige le système expert au cours de sa vie utile.

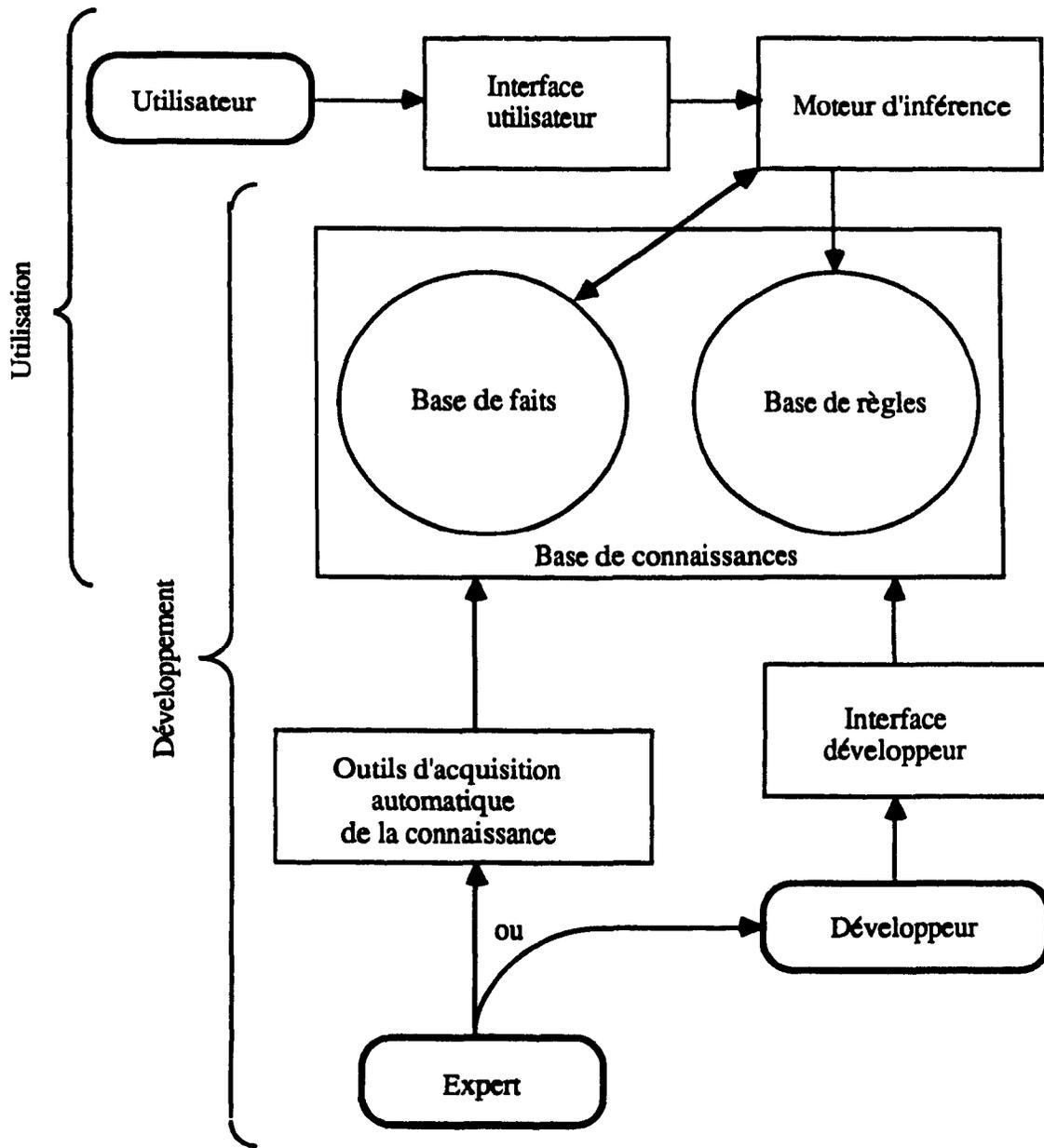


Figure 4.1 Architecture générale des systèmes experts

L'expert et le développeur

Les personnes ressources pour le développement sont l'expert du domaine et le développeur. En fait, il peut y avoir plusieurs experts et développeurs, selon que la quantité d'information est volumineuse ou que la connaissance résultant dans le système synthétise

celle de plusieurs experts [Boose et Bradshaw, 1987]. L'expert est la source de la connaissance propre à l'application. Le développeur a pour rôle de transmettre cette connaissance au système sous une forme qu'il pourra digérer. Le développeur est aussi appelé l'ingénieur de connaissances. Cela s'explique par la nature de son travail qui consiste à transformer sous une forme structurée et cohérente l'information brute recueillie auprès de l'expert. La partie essentielle de sa tâche est d'aider l'expert à exprimer sa connaissance. En effet, avoir recours à la mémoire pour répondre à des questions précises et spécifiques est chose aisée mais retracer par soi-même toute la connaissance relative à un domaine l'est nettement moins. Un autre objectif de l'ingénieur de connaissances est de s'assurer que le système est complet. Cela implique qu'il doit repérer les trous dans la connaissance du système et chercher à les combler avec l'aide de l'expert.

L'interface au développeur

Afin que l'ingénieur de connaissances puisse communiquer efficacement avec le système expert, une interface prévue à cet effet est intégrée dans l'architecture générale de base. Elle permet de visualiser rapidement les informations significatives, de les présenter sous une forme facile à lire, à l'aide de graphismes et de couleurs par exemple, et de permettre des manipulations et changements rapides de la connaissance du système.

Les outils d'acquisition automatique de la connaissance

Traditionnellement, l'acquisition des connaissances était toujours assurée par un ingénieur de connaissances qui usait de méthode et de psychologie. Mais le caractère rigoureux, logique et systématique de cette tâche a mené à de récentes recherches sur son automatisation. Quelques nouvelles applications telles que AQUINAS [Boose et Bradshaw, 1987], MORE [Khan, 1988], MOLE [Eshelman, 1988], SALT [Marcus, 1988], se sont consacrées à l'acquisition automatique de la connaissance dans divers domaines. Elles permettent à l'expert de rentrer directement sa connaissance dans le système expert dans un langage qui lui est compréhensible. Ces outils tentent de répondre aux mêmes préoccupations que l'ingénieur de connaissances, c'est-à-dire s'assurer de la structuration, de la cohérence et de la complétude de la connaissance du système.

La base de connaissances

La connaissance du système expert est regroupée dans la base de connaissances. Dans la connaissance nous pouvons distinguer les faits et les transformations que l'esprit applique sur ces faits. Les faits sont des instanciations d'éléments, par exemple l'existence d'un autobus particulier, des caractéristiques de ses éléments (l'autobus est vert) ou des relations par rapport à d'autres éléments (l'autobus transporte Marion et Sébastien). Les transformations qui s'appliquent aux faits associent à certaines combinaisons de faits des conclusions qui peuvent consister à créer de nouveaux faits ou à en modifier certains. Par exemple, la proposition "si la partie verte du homard est foncée alors il n'est pas frais" permet dans la situation où nous mangeons du homard de déduire son état de fraîcheur, qui est un nouveau fait, à partir de sa couleur, qui en est un déjà observé. Donc la connaissance peut être divisée en faits et en actions sur ces faits.

La base de connaissances d'un système expert reflète aussi cette distinction. Les faits sont regroupés dans la base de faits et les transformations sur les faits dans la base de règles.

La base de faits

Les faits sont organisés dans la base de faits. Comme nous l'avons déjà évoqué, les faits consistent en éléments, en leur caractéristiques et en leurs rapports avec les autres. L'ensemble de ces informations forment un réseau sémantique. Nous en donnons un exemple à la figure 4.2 pour en illustrer les principes importants.

Les éléments et leurs attributs sont encadrés et les rapports avec les autres éléments sont indiqués par des flèches annotées. Il faut tout d'abord distinguer les éléments génériques des éléments instanciés. Les éléments instanciés sont ceux qui ont une existence concrète, ce qui est le cas de François Janneau et d'Akaguera. Les éléments génériques désignent une classe d'éléments et sont des moules pour produire des éléments instanciés. C'est la relation "est une instance de" qui indique le lien entre un élément instancié et son élément générique. Il est possible de définir une hiérarchie de classes par la relation "est un" comme nous l'avons pour "Homme" qui est une sous-classe de "Mammifère". Cela permet

de distribuer des caractéristiques générales à plusieurs sous-classes plus spécifiques et de refléter plus fidèlement la représentation du monde de l'homme. Ainsi, l'homme hérite des caractéristiques des mammifères telles que d'avoir un sexe et d'être vertébré. Les autres relations telles que "joue dans" et "a pour style" expriment des rapports plus spécifiques. Le réseau sémantique intègre et organise toute la connaissance de faits d'une application.

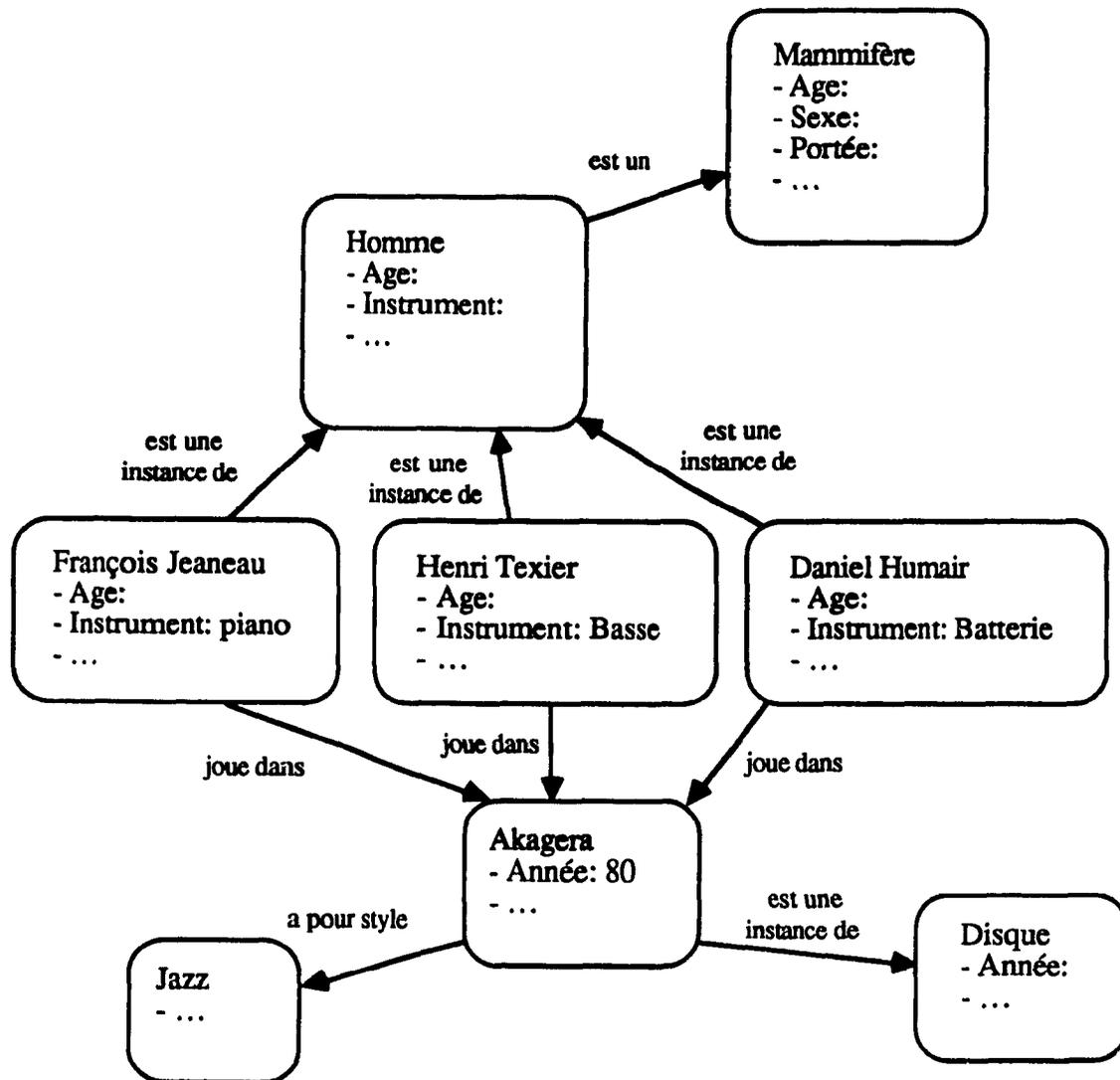


Figure 4.2 Exemple de réseau sémantique

La base de règles

La base de règles regroupe la partie de la connaissance qui transforme la base de faits. Ce type de connaissances associe à une combinaison de faits particulière des conclusions ou des actions qui vont éventuellement transformer la base de faits. Elle est représentée par des règles dans le système expert dont la forme générale est:

SI conditions ALORS conclusions

Par exemple:

SI	la fenêtre de la chambre est ouverte
ET	il y a des plantes dans la chambre
ET	il fait très froid à l'extérieur
ALORS	les plantes vont mourir

Les règles sont des morceaux de connaissances qui sont indépendants les uns des autres et qui représentent dans leur totalité la connaissance de l'expert qui lui permet d'induire et déduire des informations.

4.2.2 La partie utilisation du système expert

Comme la figure 4.1 (p. 18) le montre, la base de connaissances du système expert est utilisée aussi dans la phase d'utilisation du système expert puisqu'elle consiste à exploiter cette connaissance pour résoudre des problèmes. Étant donné qu'elle vient d'être décrite, nous n'en discuterons pas dans ce chapitre.

L'utilisateur

L'utilisateur est la personne qui est confrontée aux problèmes que le système expert peut aider à résoudre. En général, l'utilisateur a recours au système expert car il y trouve l'expertise qui lui manque, ou bien parce que le système reproduit des traitements beaucoup plus rapidement qu'il ne pourrait le faire, ou encore parce que le problème est d'une complexité telle qu'il dépasse les capacités d'un seul homme.

L'interface à l'utilisateur

Tout comme l'interface au développeur, l'interface utilisateur doit rendre facile d'utilisation le système expert. Des systèmes de fenêtrages, du graphisme, de la couleur peuvent aider à rendre les systèmes ergonomiques. L'aspect primordial de l'interface utilisateur est de s'adapter au profil de l'utilisateur, c'est-à-dire qu'il doit lui présenter les informations qui lui sont utiles et utiliser un langage approprié. L'interface devra être conçue selon que l'utilisateur est un néophyte ou un spécialiste.

Le moteur d'inférence

Le moteur d'inférence est, comme son nom l'indique, la partie qui anime le raisonnement du système expert. Ce raisonnement consiste en un enchaînement de règles. Il existe deux façons de les enchaîner: le chaînage avant et le chaînage arrière.

Le fonctionnement du chaînage avant suit les étapes suivantes:

1. Repérer les règles dont les conditions sont satisfaites étant donné la configuration de la base de faits.
2. En choisir une parmi celles-ci.
3. L'exécuter et apporter les changements correspondant à la base de faits.

Puis ce cycle sera recommencé en considérant le nouvel état de la base de faits jusqu'à ce que le but soit atteint. Ce procédé est déductif puisque le point de départ conduit, étape par étape, au but recherché.

Quant au chaînage arrière le cycle du fonctionnement est le suivant:

1. Repérer les règles dont les conclusions correspondent au but.
2. En choisir une parmi celles-ci
3. Considérer les conditions de la règle comme les nouveaux buts à atteindre.

Dans ce cas, le but est transformé en sous-buts par les conditions de la règle sélectionnée au 2. À chaque cycle, les sous-buts se transforment en de nouveaux sous-buts jusqu'à ce que la base de faits vérifie tous les sous-buts. Le procédé ici est donc inductif.

Le moteur d'inférence n'adopte généralement qu'une seule des deux approches bien qu'il puisse les combiner.

Dans le cas où un chaînage mène à une impasse, le moteur d'inférence va retourner à un point antécédent pour essayer une nouvelle voie qu'il avait tout d'abord écartée lors de la sélection de règles (étape 2).

Nous constatons sur la figure 4.1 que la flèche entre le moteur d'inférence et la base de faits est à double sens, car la base de faits est lue à l'étape 1 et est modifiée à l'étape 3 dans le cas du chaînage avant, tandis que celle qui relie le moteur d'inférence à la base de règles est dans un seul sens, car la base de règles n'est pas modifiée au cours de la résolution d'un problème (sauf dans le cas de certains prototypes qui font de l'auto-apprentissage tels que SOAR [Laird et al., 1986]).

Les critères de sélection de règles utilisés à l'étape 2 sont indépendants de l'application. Ils peuvent consister à choisir la règle qui a été exécutée le plus récemment ou celle qui comprend le plus de conditions. C'est à l'ingénieur de connaissances de bien formuler les règles pour tenir compte des critères de sélection qui dépendraient de l'application.

4.2.3 Comparaison des systèmes experts et des programmes algorithmiques

Comme nous l'avons évoqué aux chapitres 3.4 et 4.1, le fonctionnement des systèmes experts diffère fondamentalement de celui des programmes algorithmiques. Dans les programmes algorithmiques, l'exécution suit un enchaînement préétabli alors que ce n'est pas le cas pour les systèmes experts. La figure 4.3 montre cette différence. Pour le programme algorithmique, l'enchaînement des instructions est soit direct, soit soumis à un simple aiguillage. Tandis que pour le système expert, l'enchaînement des règles est redéterminé à chaque cycle du raisonnement et suit l'évolution de la base de faits. Son raisonnement, qui est l'enchaînement des actions, est donc complètement dynamique, ce qui lui donne une grande souplesse.

L'autre différence importante est la façon dont les connaissances sont représentées. Dans les programmes traditionnels, les faits sont enregistrés dans des variables simples ou structurées (tableaux, enregistrements,...). Tandis que dans les systèmes experts ils sont intégrés dans un réseau sémantique. Cette dernière façon de représenter la connaissance

permet de préserver la sémantique des informations et augmente donc la puissance du traitement dans les applications qui ont recours à cette sémantique. D'autre part, la connaissance de transformation des faits sont des instructions dans le cas des programmes algorithmiques et des règles dans le cas des systèmes experts. Comme nous l'avons déjà évoqué, les règles sont plus appropriées pour représenter les connaissances d'un expert car celle-ci est fragmentaire et éparse.

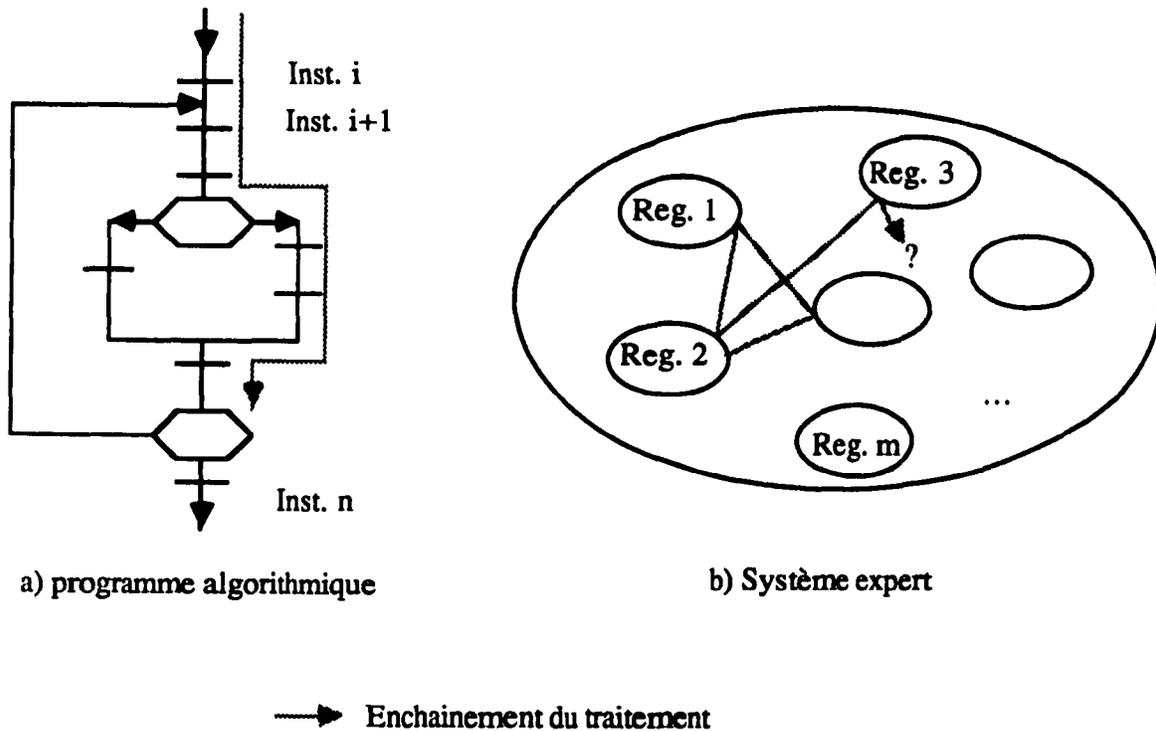


Figure 4.3 Comparaison entre l'exécution de programmes algorithmiques et de systèmes experts

Il est évident que les systèmes experts pourraient être transcrits dans des langages algorithmiques, puisque les systèmes experts sont écrits dans des langages symboliques tels que Lisp ou dans des langages traditionnels tels que C et que les compilateurs de langages fonctionnels peuvent être réalisés à l'aide de langages conventionnels. Autrement dit, les systèmes experts peuvent être exprimés sur des machines de Turing. D'autre part, tous les enchaînements de règles pourraient être préalablement énumérés, ce qui serait un processus NP, et le système expert serait alors transcrit dans des langages conventionnels.

Cependant, il est beaucoup plus commode de décrire certains problèmes sous forme d'ensemble de faits et de règles.

Selon le type de problème, certaines approches informatiques conviennent mieux que d'autres. Les systèmes experts conviennent aux problèmes qui sont traités par des humains du fait de leur expertise et de leur faculté de raisonner logiquement, comme le font les ingénieurs. Les principaux domaines d'application reconnus pour les systèmes experts sont, si l'on se fie aux grandes conférences en intelligence artificielle telle que AAAI, IJCAI, Avignon et à l'ouvrage de Waterman [Waterman, 1986]: l'entretien (qui regroupe le diagnostic, la prévision et la surveillance), la planification, la conception, le contrôle de processus, l'enseignement assisté par ordinateur, la finance, la démonstration de théorèmes, l'aide à l'opération de systèmes complexes.

4.3 Les systèmes experts basés sur une connaissance de surface

La connaissance de surface désigne une connaissance qui capte l'expertise d'un domaine. Ses justifications par des lois physiques ou par la logique sont abstraites. On la nomme aussi connaissance heuristique. Voici deux exemples de règles heuristiques:

SI	Il ne reste que les deux rois et un fou sur l'échiquier
ALORS	La partie est nulle

SI	Le patient a les yeux jaunes
ET	Qu'il a une haleine acétoneuse
ALORS	Il a des problèmes de foie

La première règle reflète ce que sait un joueur ayant lu un livre d'échecs ou ayant réfléchi à cette situation de fin de partie. Sa justification ou sa preuve est abstraite, la règle n'en est plus que la compilation. De même, la deuxième règle abstrait l'explication chimique qui explique pourquoi une maladie du foie provoque les yeux jaunes et l'haleine acétoneuse mais représente la connaissance synthétisée du médecin.

Les premiers systèmes experts étaient basés sur ce type de connaissance. MYCIN [Shortliffe, 1984] en est un exemple célèbre dans le domaine du diagnostic médical. DELTA [Bonissone et Johnson, 1983] en est un autre dans le domaine du diagnostic de

locomotives. Radian Corp. [Riese, 1985] et Marin et Jasmin [Marin et Jasmin, 1989a] ont aussi développé des systèmes experts de diagnostic pour transformateurs selon ce principe.

L'avantage des systèmes experts basés sur la connaissance de surface est qu'ils sont rapides à développer et efficaces à l'exécution. Cela s'explique par le fait que la connaissance recueillie est déjà la compilation d'un savoir plus détaillé et que par conséquent on évite de considérer les raisons élémentaires.

Par contre, ce type de systèmes ne peut traiter que les cas considérés à l'avance. Il se peut que le système expert soit capable de résoudre une bonne partie des problèmes directement mais il restera impuissant par rapport à ceux qui ne figurent pas dans l'expression de ses règles. L'autre limitation se pose dans le cas de systèmes dont les manifestations d'anormalités sont très nombreuses, tels que des circuits digitaux où les observations en sorties peuvent prendre presque une infinité de valeurs. Pour ces systèmes, un traitement heuristique est lourd, voir impossible.

4.4 Les systèmes experts basés sur une connaissance profonde

Par opposition à la connaissance de surface, la connaissance profonde reflète les lois physiques, les principes de raisonnement, les chaînes d'explications élémentaires dont la connaissance heuristique est une synthèse. Voici un exemple de règle profonde:

SI	Un composant est défectueux
ALORS	Au moins un de ses sous-composants est défectueux

Les systèmes experts basés sur une connaissance profonde possèdent un modèle du système sur lequel ils raisonnent. La structure physique du système, c'est-à-dire la description de ses parties et de leurs connections, et la structure fonctionnelle, c'est-à-dire la description du rôle et du comportement des parties et de leurs interactions, servent de base. Les principes de raisonnement vont exploiter ces modèles pour amener les systèmes experts vers une solution. Le raisonnement profond, appelé aussi raisonnement à partir des premiers principes, reproduit un raisonnement dans le style de celui de l'ingénieur.

Cette approche se situe davantage à un stade expérimental. Elle a tout d'abord été utilisée dans le domaine de l'électronique digitale, étant donné le caractère logique et

structuré de ce domaine. DART [Genesereth, 1984] est un exemple de ce type de système expert pour le diagnostic. Davis [Davis, 1984], De Kleer et Williams [De Kleer et Williams, 1987] ont posé des jalons importants pour cette approche. LES [Scarl et al.] en est un autre exemple pour le diagnostic du système de chargement de l'oxygène liquide dans les réservoirs de la navette spatiale. IN-ATE [Cantone, 1985] et I-CAT [Automated Reasoning, 1988] sont deux coquilles pour le développement de systèmes experts de diagnostic de ce type.

Les systèmes experts basés sur la connaissance profonde sont moins rapides à l'exécution que ceux qui sont basés sur la connaissance heuristique, car le détail des raisons conduisant aux conclusions est pris en compte et nécessite une description structurelle ou fonctionnelle des systèmes sur lesquels ils raisonnent. Par contre, de tels systèmes experts peuvent traiter des cas qui n'avaient pas été envisagés à l'aide de la description de la structure.

4.5 Les systèmes experts mixtes

Les systèmes experts mixtes sont ceux qui utilisent à la fois la connaissance de surface et la connaissance profonde. Cette approche est de plus en plus recherchée car elle combine les avantages des deux types de connaissances. Il existe deux façons de les combiner: la connaissance profonde sert à résoudre les problèmes qui n'ont pas pu être résolus par l'heuristique, ou bien une connaissance localise le problème et l'autre prend la relève pour l'analyse locale. Abbott [Abbott, 1988] et Smith et Biswas [Smith et Biswas, 1989] ont développé des systèmes experts de diagnostic suivant la première combinaison. Pazzini [Pazzini, 1987], Fink et Lush [Fink et Lush, 1987], Marrakchi [Marrakchi et al., 1985] ont utilisé l'heuristique d'abord pour focaliser l'analyse. YAKA [McDermott, 1988] est un système expert qui utilise la structure fonctionnelle du système pour localiser une panne et la traite ensuite au niveau du composant par une connaissance heuristique.

5. LES SYSTÈMES EXPERTS D'AIDE AU DIAGNOSTIC D'APPAREILS ÉLECTRIQUES

Le diagnostic est un domaine d'application important de l'intelligence artificielle. Nous avons vu aux chapitres 3 et 4 que le diagnostic était un acte intelligent et que par conséquent les systèmes experts sont des outils plus adaptés au diagnostic industriel que les méthodes conventionnelles. De la même façon, ils conviennent mieux au diagnostic de l'appareillage électrique.

Nous avons distingué deux types de systèmes experts, ceux qui sont basés sur la connaissance de surface et ceux basés sur la connaissance profonde. Les premiers constituent une technologie bien maîtrisée qui a déjà obtenu des résultats probants dans beaucoup de domaines y compris celui du diagnostic de l'appareillage électrique [Marin et Jasmin, 1989a] [Riese, 1985]. Nous n'en rediscuterons donc pas. Par contre, ceux du deuxième type restent un sujet de recherche toujours très actif dans la communauté de l'intelligence artificielle et permettraient de pallier les limitations des systèmes experts du premier type qui sont de ne pouvoir traiter que les cas déjà décrits dans la base de connaissance et de ne pas être adaptés aux systèmes dont les manifestations de panne sont en nombre presque infini.

Les systèmes experts utilisant l'approche profonde ont déjà obtenu des succès dans le domaine de l'électronique digitale. Mais leur application est plus difficile dans le cas de systèmes physiques complexes. Cela s'explique par le fait que les circuits digitaux ont une structure physique et fonctionnelle apparente. En effet, on distingue clairement les composants et les connexions qui constituent la structure physique. Quant à la structure fonctionnelle, elle aussi est apparente car les composants réalisent des opérations logiques ou arithmétiques.

Cependant, leur application à des systèmes physiques complexes est plus expérimentale. D'abord, la structure physique n'est pas toujours apparente car si l'identification des composants ne pose pas de problème, celle de leurs connexions est moins aisée étant donné qu'elles peuvent être de natures très diverses. Par exemple, les connexions peuvent être de nature électromagnétique, thermique, électrique, etc. La disposition des éléments est un indice pour les déduire mais nous constatons qu'elle reste néanmoins plus difficile à établir pour les systèmes physiques que pour l'électronique

digitale. La structure fonctionnelle identifie les phénomènes physiques qui opèrent dans le système. Les lois à considérer sont parfois complexes, telles que celles qui régissent l'écoulement de fluides dans des conduits, ou restent inconnues. Le raisonnement sur la structure se bute donc à des obstacles pour les systèmes physiques complexes qui font toujours l'objet d'études.

C'est justement l'approche par les systèmes experts basés sur la connaissance profonde qui fera l'objet de ce chapitre étant donné son côté encore expérimental. Nous espérons ainsi contribuer au développement de cette approche qui complète celle basée sur la connaissance heuristique et par conséquent donnera aussi lieu à des systèmes mixtes d'autant plus puissants puisqu'ils tirent avantages des deux approches.

5.1 Les systèmes experts basés sur des modèles qualitatifs

5.1.1 Intérêt des modèles qualitatifs

La description du fonctionnement d'un système se fait à l'aide d'équations liant les paramètres le caractérisant. La structure fonctionnelle sera donc un tissu de relations entre paramètres. Les lois qui régissent ce fonctionnement sont parfois très compliquées ou ne sont pas toujours connues. Lorsque les lois sont connues mais complexes, l'utilisation de leur modélisation par des ordinateurs donne lieu à des temps de calculs inacceptables. La quantification des relations de fonctionnalité d'un système présente donc des inconvénients majeurs.

Ces problèmes de quantification se posent pour les appareils électriques dans lesquels on retrouve des phénomènes électriques, mécaniques, chimiques, thermiques. Dans une génératrice, la relation exacte entre le déplacement de l'axe de rotation ou la déformation du rotor et les vibrations de l'appareil n'est pas connue. Dans un transformateur, le calcul des pertes de flux électromagnétique dans le noyau serait possible en utilisant des techniques de calculs complexes telles que celles des éléments finis.

Une alternative à la quantification des relations est de considérer leur expression simplifiée. Plutôt que de donner les équations exactes représentant le fonctionnement du

systeme, les equations qualitatives correspondantes pourraient servir à sa description. Dès lors, le fonctionnement du système est décrit approximativement à la façon dont les ingénieurs procèdent avec leur bon sens. Le problème de complexité des calculs que posait la quantification des relations est ainsi réduit. La précision de la description est perdue mais remplacée par une information qualitative qui est suffisante pour certains problèmes et dans certains cas. D'autre part, il se peut qu'on ne connaisse pas l'expression exacte d'une loi mais que par simple bon sens on puisse la décrire qualitativement. C'est le cas de la relation qui lie la trajectoire d'une balle de tennis avec son effet: la relation exacte n'est pas connue mais connaissant approximativement le sens et l'intensité de l'effet: on pourra appréhender sa trajectoire après le rebond. Par une description qualitative, il est parfois possible d'exprimer des phénomènes dont la quantification n'est pas possible.

Pour ces raisons que nous venons de citer, l'utilisation des relations qualitatives est populaire dans la littérature pour exprimer la fonctionnalité d'un système. Le tissu de toutes les relations qualitatives caractérise le fonctionnement du système et forme son modèle qualitatif. Étant donné l'importance de cette approche en diagnostic, nous nous y consacrerons dans ce chapitre.

Nous présenterons dans un premier temps les bases du raisonnement qualitatif, qui utilise les modèles qualitatifs, son utilisation en diagnostic, les principales théories sur les modèles qualitatifs et finalement nous concluerons sur leurs limitations.

5.1.2 Principes du raisonnement qualitatif

Le raisonnement qualitatif consiste à inférer le comportement de systèmes en faisant abstraction de la précision et du détail. Il y arrive grâce à la description fonctionnelle qui est donnée sous la forme d'un modèle qualitatif. La valeur de certaines variables est connue au départ et le raisonnement qualitatif en déduira les autres valeurs et leurs évolutions dans le temps.

Le raisonnement qualitatif s'intéresse aux zones de valeurs des variables et à leur sens de variation. L'ensemble des valeurs qualitatives possibles forme un espace-Q [Murthy, 1988]. Voici quelques exemples d'espaces-Q:

$$A = \{0, +, -\}$$

$$B = \{\dots, l_i, L_i, l_{(i-1)}, \dots, 0, \dots, l_j, L_{j+1}, l_{j+1}, \dots\}$$

où l_n est une valeur singulière et

L_n représente l'intervalle $[l_{n-1}, l_n]$

$$C = \{0, \text{petit}, \text{grand}, \dots\}$$

$$D = \{0\} \cup \{\text{les } X \text{ représentant les intervalles } [y^i, y^j] \text{ où } i \text{ et } j \text{ sont des entiers relatifs et } y \text{ un réel plus grand que } 1\}$$

L'espace-Q A est l'espace le plus connu en algèbre qualitative et a été utilisé par De Kleer et Brown [De Kleer et Brown, 1984]. Dans l'espace-Q B, les valeurs qualitatives l_i et L_i représentent soit une valeur singulière, soit un intervalle de valeurs dont les limites sont deux valeurs singulières qui se suivent. Ce type d'espace est utilisé par Kuipers [Kuipers, 1986]. L'espace-Q C a été créé par Raiman [Raiman, 1986]. L'espace-Q D a été utilisé par De Mori et Prager [De Mori et Prager, 1989].

À un espace-Q est associée une algèbre qualitative spécifique. Par exemple dans le cas de l'espace-Q A, les opérations + et * sont définies dans les tableaux 5.1 a) et b).

+	-	0	+
-	-	-	?
0	-	0	+
+	?	+	+

a)

*	-	0	+
-	+	0	-
0	0	0	0
+	-	0	+

b)

Tableaux 5.1 a) et b) Exemples d'algèbre qualitative

Nous remarquons dans le tableau 5.1 a) qu'il y a indétermination dans le cas où l'on additionne une valeur positive et une valeur négative. Cette indétermination est inhérente à l'algèbre qualitative considérée. De même, si l'on considère l'espace-Q C, le

produit d'une valeur petite par une valeur grande est indéterminé. Cette indétermination imposera des limitations sur l'utilisation que l'on peut faire de la physique qualitative comme nous le verrons par la suite.

Les dérivées des variables qualitatives jouent un rôle important dans le raisonnement qualitatif. ∂x^n désignera $[d^n x/dt^n]$ où t représente le temps. Connaissant la valeur et le sens de variation d'une variable, nous pouvons déduire son évolution possible. Nous reproduisons au tableau 5.2 les types de déductions possibles telles que Kuipers [Kuipers, 1986] les a exprimés pour l'espace-Q C qu'il utilise. Deux types de transitions sont différenciés: les transitions qui passent d'un moment précis à l'intervalle de temps qui suit, qu'il nomme les P-transitions, et les transitions qui passent d'un intervalle de temps et qui arrivent au moment qui le termine, qui sont appelées les I-transitions. Pour les transitions I8 et I9, une valeur l^* est introduite, il s'agit d'une nouvelle valeur singulière comprise dans l'intervalle $[l_{i-1}, l_i]$ dont l'existence est déduite lors du calcul du comportement du système dans le temps.

P-transitions	$t = t_i$		$t \in [t_i, t_{i+1}]$		I-transitions	$t \in [t_{j-1}, t_j]$		$t = t_j$	
	x	∂x	x	∂x		x	∂x	x	∂x
P1	l_i	0	l_i	0	I1	l_i	0	l_i	0
P2	l_i	0	L_{i+1}	+	I2	L_i	+	l_i	0
P3	l_i	0	L_i	-	I3	L_i	+	l_i	+
P4	l_i	+	L_{i+1}	+	I4	L_i	+	L_i	+
P5	L_i	+	L_i	+	I5	L_i	-	l_{i-1}	0
P6	l_i	-	L_{i-1}	-	I6	L_i	-	l_{i-1}	-
P7	L_i	-	L_i	-	I7	L_i	-	L_i	-
					I8	L_i	+	l^*	0
					I9	L_i	-	l^*	0

Tableau 5.2 Table de transitions pour l'évolution de variables

Lorsque certains paramètres atteignent un seuil, le système peut rentrer dans un état différent; un autre ensemble d'équations sert alors à représenter son fonctionnement. Par exemple, si un disjoncteur était dans une position ouverte et qu'il vient d'être actionné alors il passe dans son état fermé et les équations qui s'appliquent sont toutes autres. Le modèle qualitatif comprend tous les ensembles d'équations associés aux différents états du système et les conditions de passage d'un état à un autre.

Ces principes généraux seront illustrés dans la partie 5.4 où des exemples de raisonnement qualitatif seront donnés. Auparavant, nous situons le rôle du raisonnement qualitatif dans le diagnostic à la section suivante.

5.1.3 Utilisation du raisonnement qualitatif pour le diagnostic

Le raisonnement qualitatif permet de prédire le comportement de système à partir de conditions initiales. Autrement dit, connaissant un modèle qualitatif du système nous pouvons simuler sa réponse à des conditions hypothétiques. C'est sur cette faculté qu'est basée l'utilisation des modèles qualitatifs en diagnostic.

La méthodologie suivie pour le diagnostic basé sur les modèles qualitatifs est illustrée à la figure 5.1

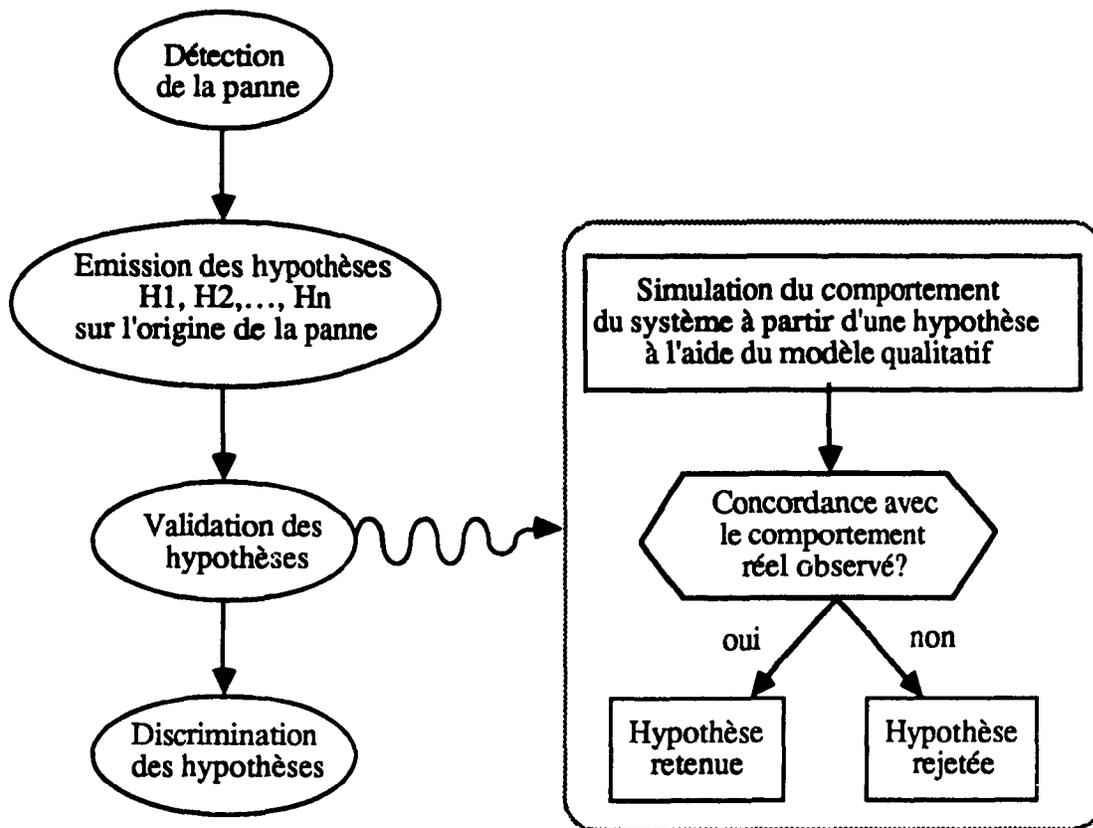


Figure 5.1 Méthodologie du diagnostic basé sur les modèles qualitatifs

Le diagnostic est déclenché lorsqu'une panne est détectée. Il peut s'agir de l'arrêt du système mais aussi d'une anomalie dans son fonctionnement. La détection de la panne est faite par l'observation de paramètres qui transgressent de leurs limites ou encore par la violation d'équations caractérisant le comportement normal.

Le diagnostic consiste lors de l'observation d'une panne à trouver son origine. Le raisonnement qualitatif va émettre des hypothèses sur l'origine de la panne et à les vérifier. C'est précisément dans cette étape de vérification que les modèles qualitatifs interviennent. Si la simulation des hypothèses conduit au comportement réel qui est observé, alors l'hypothèse est retenue. Par contre, si le résultat de la simulation ne concorde pas avec le comportement réel, alors l'hypothèse est rejetée.

Dans le cas où l'hypothèse est rejetée, nous pouvons être certains qu'effectivement elle était mauvaise, en supposant que les modèles utilisés soient corrects. Par contre, dans le cas où une hypothèse est retenue, nous ne pouvons pas avoir la même confiance dans le résultat. En effet, il se peut que plusieurs hypothèses soient validées alors qu'une cause unique est recherchée. Il faut alors procéder à une discrimination des candidats.

La discrimination des candidats se fait par des tests qui permettent d'acquérir la valeur réelle de certains paramètres qui n'est pas donnée au départ. Le résultat des tests permettra de déterminer les hypothèses qui restent valables. Cette étape de discrimination entre les candidats sera répétée jusqu'à ce qu'il ne reste qu'une solution unique ou qu'une hypothèse valide soit jugée satisfaisante par l'utilisateur.

Les hypothèses peuvent porter sur la valeur d'un paramètre ou encore sur la modification du modèle de fonctionnement normal, c'est-à-dire qu'il est supposé qu'un nouveau modèle correspond au fonctionnement anormal. Donc la description d'un système devrait comprendre le modèle de son fonctionnement normal mais aussi aussi ceux des différents dysfonctionnements qu'on lui connaît.

5.1.4 Trois méthodes de raisonnement qualitatif

Nous présentons dans cette partie les principaux travaux réalisés dans le domaine du raisonnement qualitatif et nous les appliquons à l'appareillage électrique. Cette étude nous permettra d'évaluer l'utilisation potentielle des modèles qualitatifs pour le diagnostic d'appareils électriques.

5.1.4.1 Méthode de De Kleer et Brown: les confluences

Les confluences sont le nom que de Kleer et Brown [De Kleer et Brown, 1984] donnent aux équations qualitatives. L'espace-Q utilisé est l'ensemble A mentionné au chapitre 5.2. Les confluences se présentent sous une des formes suivantes:

$$x + y - z = 0 \quad \text{ou}$$

$$\partial x + \partial y - \partial z = 0 \quad \text{ou}$$

$$x * \partial y + \partial x = 0$$

Elles sont dérivées de deux façons différentes, soit à partir des équations quantitatives, soit à partir d'une connaissance intuitive du fonctionnement de l'appareil. Différents ensembles de confluences expriment le fonctionnement du système dans les états qu'il peut prendre. Ces ensembles de confluences ainsi que les conditions de passage d'un état à un autre constituent le modèle qualitatif du système.

De Kleer et Brown déduisent la structure fonctionnelle à partir de la structure physique. La structure physique fournit la liste des composants constituant le système ainsi que leur disposition. De Kleer et Brown supposent qu'une bibliothèque d'éléments génériques est disponible, et qu'en instanciant un composant, sa structure fonctionnelle est fournie. Ainsi, la structure fonctionnelle du système est l'assemblage des structures fonctionnelles de ses parties.

Étant donné que les lois physiques régissant un composant sont connues au travers de son élément générique, c'est donc qu'elles sont considérées indépendantes du fonctionnement de l'ensemble. Ce principe est énoncé sous le nom de "no-function-in-structure" et justifie que les modèles soient élaborés par assemblage.

Certaines hypothèses, que De Kleer et Brown appellent "class-wide assumptions", sont relatives à toute une classe d'éléments. Par exemple, l'hypothèse d'incompressibilité peut être généralisée à tous les fluides. Cela autorise l'héritage de certaines caractéristiques pour des éléments qui s'intègrent dans une classe et par conséquent simplifie la représentation de la connaissance.

Afin d'illustrer l'utilisation des confluences pour le diagnostic, nous avons choisi pour application un transformateur dont la panne à traiter est une température excessive de l'huile.

Nous considérerons une représentation simplifiée du transformateur et la modélisation qualitative que nous en ferons sera du premier ordre et couvrira simplement l'aspect thermique. La figure 5.2 représente le schéma du transformateur.

Nous utiliserons les paramètres suivants pour caractériser l'état du transformateur:

- P_c : Puissance calorifique dissipée par le noyau et ses enroulements (dans l'huile).
- P_f : Puissance calorifique de refroidissement du circuit de refroidissement.
- T_h : Température de l'huile.
- T_a : Température de l'air.
- I_1, \dots, I_6 : Courants dans les enroulements.
- R_1, \dots, R_6 : Résistances du circuit équivalent.
- Q : Débit de l'huile dans le circuit de refroidissement.

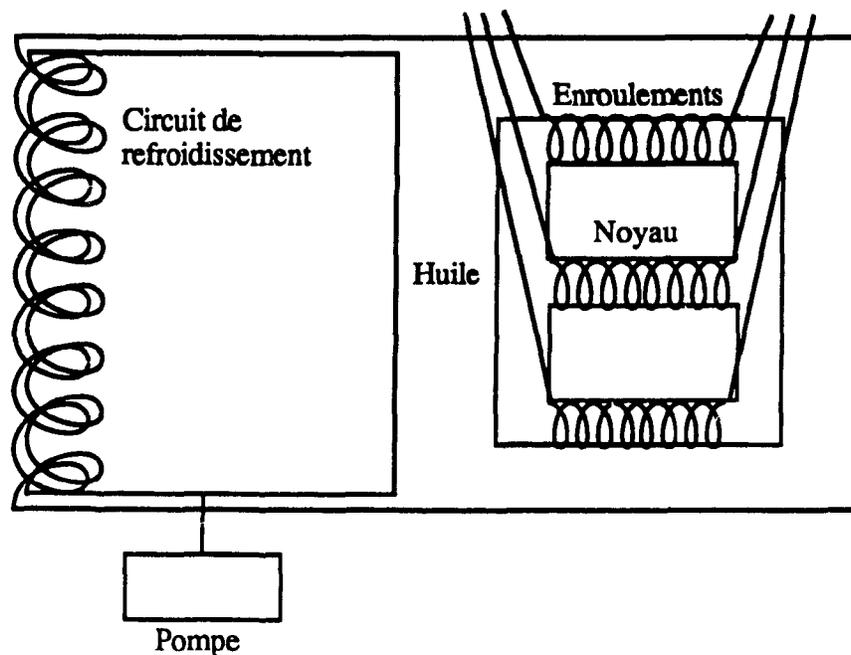


Figure 5.2 Schéma du transformateur

Les confluences qui s'appliquent à notre système sont:

- (1) $\partial T_h = P_c - P_f$
- (2) $\partial P_c = \partial I_1 + \partial R_1 + \partial I_2 + \partial R_2 + \dots + \partial I_6 + \partial R_6$
- (3) $\partial P_f = \partial T_h - \partial T_a$
- (4) $\partial P_f = \partial Q$

(1) provient de notre intuition que la température de l'huile varie en fonction de l'énergie globale que l'huile reçoit.

(2) est dérivée de la loi de Joule.

(3) découle de notre intuition que plus l'écart de température est grand entre deux systèmes qui se communiquent leur chaleur, plus cet échange est important.

(4) se déduit intuitivement aussi du fait que le refroidissement de l'huile est influencé par le débit du circuit de refroidissement.

Supposons que nous recevons le signal d'une alarme de température pour le transformateur alors que les conditions d'opération sont normales. Nous détectons en fait une panne dont la manifestation est $\partial T_h = +$. A partir de là, nous devons faire des hypothèses sur sa cause. Nous considérerons comme possibilités de panne une baisse de débit dans le circuit de refroidissement ($\partial Q = -$) et une hausse de la température ambiante ($\partial T_a = +$). Nous pourrions considérer d'autres hypothèses mais par souci de simplification nous nous limiterons à celles-là seulement.

Supposons donc que $\partial Q = -$ et procédons à la simulation à l'aide du modèle qualitatif considéré:

$$(4) \implies \partial P_f = -$$

D'autre part, nous supposons que seul le débit est anormal et que les conditions d'opération sont normales, donc que les courants et les résistances du circuit équivalent sont constants et par conséquent:

$$(2) \implies \partial P_c = 0$$

Étant donné qu'avant la panne on avait $P_c - P_f = 0$, et que $\partial P_f = -$ et $\partial P_c = 0$ donc $P_c - P_f = +$ et finalement:

$$(1) \implies \partial T_h = +$$

Donc nous retenons une baisse de débit dans le circuit de refroidissement comme solution à notre problème. De même, nous trouverions qu'une élévation de la température de l'air pourrait être une autre solution. Par une simple lecture d'un capteur de débit du circuit de refroidissement, l'hypothèse de la baisse de débit serait confirmée et par une lecture du thermomètre extérieur, l'hypothèse sur l'accroissement de la température de l'air serait rejetée.

Ayant localisé la panne au niveau du circuit de refroidissement, un modèle de cette partie pourrait être utilisé pour trouver ce qui a causé cette baisse de débit. L'analyse se raffinerait ainsi jusqu'à ce que des composants élémentaires, c'est-à-dire non-décomposables, soient atteints ou que l'explication soit jugée satisfaisante par l'utilisateur.

5.1.4.2 Méthode de Forbus: les processus qualitatifs

Forbus [Forbus, 1984] décrit l'évolution d'un système comme une suite de processus. Un processus est caractérisé par cinq parties:

- des objets et leurs attributs
- des préconditions
- des conditions sur les attributs des objets
- des relations
- des influences.

Les objets et leurs attributs décrivent les éléments intervenant dans un processus et identifient les paramètres qui y jouent un rôle.

Les préconditions portent sur les objets tout comme les conditions sur attributs, mais sont plus générales. Par exemple, une précondition au processus d'échauffement du transformateur est qu'il soit connecté au réseau.

La différence entre les relations et les influences est que les influences sont les causes directes qui agissent sur le processus. Par exemple, le courant dans les enroulements sont des influences dans le processus d'échauffement du transformateur, alors que les relations sont les rapports entre attributs qu'imposent le processus. Par exemple, "la quantité de chaleur que l'huile rejette à l'extérieur est proportionnelle à la différence de température entre l'huile et l'air" est une relation.

Les différents processus sont d'abord énoncés et les évolutions possibles sont ensuite déduites. Lorsqu'un processus est actif, il va modifier les valeurs de certains paramètres et les conditions d'activation ou de désactivation de processus pourront être satisfaites. Les nouveaux processus vont à leur tour influencer l'ensemble des paramètres du système et l'enchaînement des processus se poursuivra ainsi. Des états stables seront éventuellement atteints.

Nous appliquerons cette méthode au diagnostic du parafoudre à plomb qui est représenté à la figure 5.3 (tirée de [Pansini, 1988]).

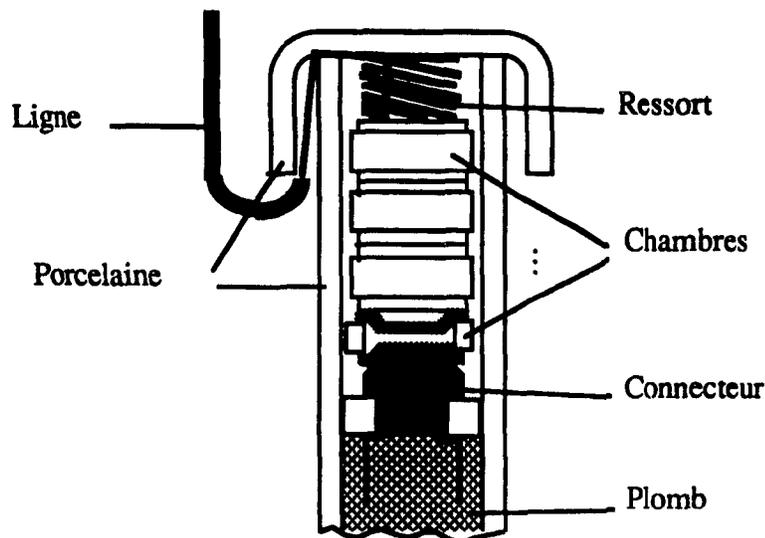


Figure 5.3 Représentation du parafoudre

Le parafoudre peut se schématiser comme indiqué à la figure 5.4.

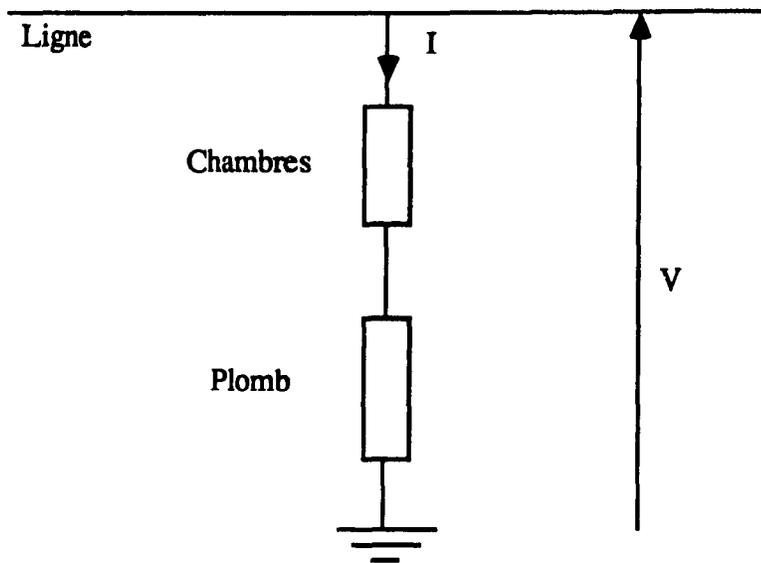


Figure 5.4 Schématisation du parafoudre

Le parafoudre sert à protéger certains équipements comme les transformateurs contre des surtensions importantes dans le réseau causées par exemple par un éclair. Lorsque la tension de la ligne est normale, le parafoudre se comporte comme un circuit ouvert, aucun courant ne le traverse. Mais sitôt qu'une surtension se produit, le parafoudre se comporte comme un court-circuit et donc déleste la surcharge dont aurait souffert autrement l'appareil protégé.

Ce comportement est obtenu en mettant en série des entrefers avec une colonne de plomb. Le plomb à température normale est conducteur mais cette conductivité décroît avec un accroissement de température à cause d'une réaction chimique qui s'opère au sein du plomb. Lorsque la surtension dépasse la tension critique de l'entrefers, les chambres se mettent à conduire. Lorsque la tension revient en-dessous du seuil, les chambres continueraient de conduire si le plomb n'isolait pas de la masse. C'est parce que le plomb en chauffant devient mauvais conducteur que les chambres retrouvent leur état de circuit ouvert.

Nous allons décrire qualitativement ce fonctionnement par l'approche de Forbus en utilisant trois processus. La description des processus sera un peu moins formelle que ne l'a présenté Forbus, mais l'approche sera néanmoins respectée.

Processus Fonctionnement-normal

Objets:

- Le parafoudre
- La ligne
- La masse
- Les chambres (ou l'entrefer) du parafoudre
- Le plomb du parafoudre
- Un laps de temps, E.

Préconditions:

Le parafoudre est connecté entre la ligne et la masse.

Conditions sur les paramètres:

- Les chambres ne conduisent pas tout au long de E.
- Le plomb est dans son état conducteur tout au long de E (ou encore, la température du plomb est égale à la température ambiante).
- La tension de la ligne est inférieure à la tension critique du parafoudre.

Relations:

Le courant dans le parafoudre est nul.

Influence:

(*Il n'y en a pas dans ce processus*)

Processus Déclenchement

Objets:

- Le parafoudre
- La ligne
- La masse
- Les chambres (ou l'entrefer) du parafoudre
- Le plomb du parafoudre
- Un laps de temps, E.

Préconditions:

Le parafoudre est connecté entre la ligne et la masse.

Conditions sur paramètres.

- La tension de la ligne atteint la tension critique du parafoudre au début de E.
- La tension est endessous de la valeur critique du parafoudre

à la fin de E.

Le plomb est conducteur au début de E.

Le plomb a une conduction suffisamment faible à la fin de E pour remettre les chambres dans leur état de circuit ouvert.

Relations:

Du courant circule dans le parafoudre.

La température du plomb augmente tant que le courant circule.

La conductivité du plomb décroît quand sa température augmente.

Influence:

La tension de la ligne cause la circulation d'un courant dans le parafoudre.

Processus Retour-au-fonctionnement-normal

Objets:

Le parafoudre

La ligne

La masse

Les chambres (ou l'entrefer) du parafoudre

Le plomb du parafoudre

Un laps de temps, E.

Préconditions:

Le parafoudre est connecté entre la ligne et la masse.

Conditions sur paramètres:

La tension de la ligne est inférieure à la tension critique du parafoudre.

Le plomb n'est pas conducteur au début de E (sa température est grande).

Le plomb est conducteur à la fin de E (sa température revient à la normale).

Les chambres sont dans l'état circuit ouvert tout au long de E.

Relations:

Un transfert de chaleur s'opère entre le plomb et l'atmosphère et est proportionnel à l'écart de température.

La température du plomb décroît avec le transfert de chaleur.

Influence:

La température de l'atmosphère refroidit le plomb.

Supposons que nous observions qu'à la suite d'une surtension le parafoudre se déclenche mais qu'il reste dans un état de court-circuit. Nous pouvons émettre comme

hypothèse qu'une des chambres a été affectée par la décharge et que par conséquent la tension critique du parafoudre est devenue plus petite que la tension normale de la ligne.

Cette hypothèse consiste à modifier le modèle du parafoudre qui vient d'être décrit. Le processus Déclenchement est modifié par notre hypothèse, la nouvelle relation "la valeur de la tension critique du parafoudre est diminuée avec le passage du courant" est rajoutée. Alors les conditions de désactivation du processus Déclenchement et les conditions d'activation du processus Retour-au-fonctionnement-normal ne sont jamais satisfaites. L'hypothèse conduit bien au comportement observé et elle est retenue comme une cause possible de la panne.

5.1.4.3 Méthode de Kuipers: les réseaux de contraintes qualitatives

L'approche de Kuipers [Kuipers, 1986] se rapproche de celle de De Kleer et Brown. Kuipers exprime les relations entre paramètres d'un système dans un réseau, que nous appelons réseau de contraintes et qui représente le modèle qualitatif, où figurent les relations entre paramètres et y propage des perturbations. La différence notable avec les autres méthodes est que des points singuliers peuvent être déduits dynamiquement.

Le réseau est constitué des relations suivantes:

M+ (f,g): f et g sont proportionnels

M- (f,g): f et g sont inversement proportionnels

ADD (f,g,h): h est la somme de f et g

MULT (f,g,h): h est le produit de f par g

DERIV (f,g): f est la dérivée de g par rapport au temps

Encore une fois, nous appliquerons cette méthode au diagnostic du transformateur. Cependant, nous nous servons de cet exemple pour dénoncer quelques limitations de l'utilisation des modèles qualitatifs en diagnostic. Nous supposerons que la panne observée est une température excessive atteinte lors du démarrage du transformateur. Nous considérerons une mauvaise hypothèse, qui suppose que le transformateur fonctionne normalement, et nous montrerons qu'on ne peut conclure sur sa validation.

La figure 5.5 représente le réseau de contraintes de la partie thermique du transformateur en bon état.

Paramètre	Signification
I	Courant dans les enroulements
Q_N in	Flot de chaleur communiqué au noyau et aux enroulements
Q_N out	Flot de chaleur que le noyau et les enroulements communiquent à l'huile
Q_N net	Flot de chaleur capté par le noyau et les enroulements et causant leur élévation de température
T_N	Température du noyau et des enroulements
Q_H out	Flot de chaleur que l'huile communique à l'air
Q_H net	Flot de chaleur capté par l'huile et causant son élévation de température
T_H	Température de l'huile
T_A	Température de l'air

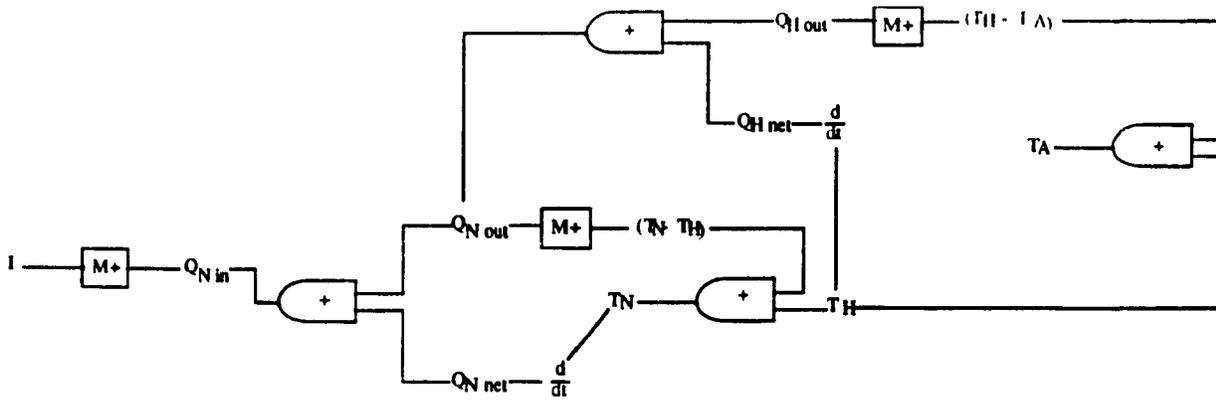


Figure 5.5 Réseau de contraintes de la partie thermique du transformateur

Le réseau représente les relations suivantes:

- Q_N in est proportionnel à I
- Q_N in = Q_N out + Q_N net
- Le signe de la dérivée de T_N , qui représente le sens de variation, est le signe de Q_N net
- Q_N out est proportionnel à la différence de température $T_N - T_H$;
Le signe de la dérivée de T_N , qui représente son sens de variation,

- est le signe de $Q_{N\ net}$
- $Q_{N\ out} = Q_{H\ out} + Q_{H\ net}$
- $Q_{H\ out}$ est proportionnel à la différence de température $T_H - T_A$
- Le signe de la dérivée de T_H est le signe de $Q_{H\ net}$

Supposons donc que nous observions que la température du transformateur dépasse un seuil critique et déclenche par conséquent l'alarme de température lors de sa mise en marche. Considérons l'hypothèse: le transformateur s'est comporté normalement, c'est-à-dire que nous considérons que le modèle de la partie thermique que nous venons de décrire est le bon. Procédons à la vérification de cette hypothèse par simulation à l'aide du réseau de contraintes.

La simulation de cette hypothèse a été réalisée à l'aide du programme Q [Farquhar et Kuipers, 1987] [Kuipers, 1987b] sur des TI Explorer II et les résultats sont présentés aux figures 5.6 a) à 5.6 l). La description du programme est donnée en annexe. La perturbation qui a été rentrée est le passage du courant d'une valeur nulle à sa valeur normale et les températures de l'huile et du noyau sont considérées égales à la température de l'air initialement.

Les résultats de la simulation indiquent seulement pour la figure 5.6 d) que la température de l'huile va atteindre une limite. Les figures 5.6 a), c), e), g), h), i), j), l) indiquent que la température de l'huile va croître indéfiniment (cela se déduit en examinant les chaleurs captées par l'huile et le noyau). Dans les autres cas, l'interprétation des résultats peut être que la température de l'huile va croître indéfiniment ou qu'elle va atteindre une limite asymptotiquement.

Nous sommes donc confrontés à plusieurs résultats contradictoires possibles pour la simulation. Certains correspondent directement à la panne observée, c'est la cas des résultats indiquant une croissance constante de la température de l'huile; d'autres sont ambigus. En effet, si un résultat prédit que la température va atteindre une valeur limite, il peut s'agir d'une valeur supérieure à la température critique du transformateur.

Le résultat de la simulation ne peut donc pas être exploité car d'une part, nous ne pouvons pas lever l'ambiguïté sur quels résultats sont corrects et d'autre part, même dans le cas où un résultat prédit qu'une limite va être atteinte, nous n'avons pas l'information suffisante pour savoir si elle est au-dessus de la valeur critique du transformateur.

Figure 5.6 a) Premier résultat de la simulation du comportement thermique du transformateur

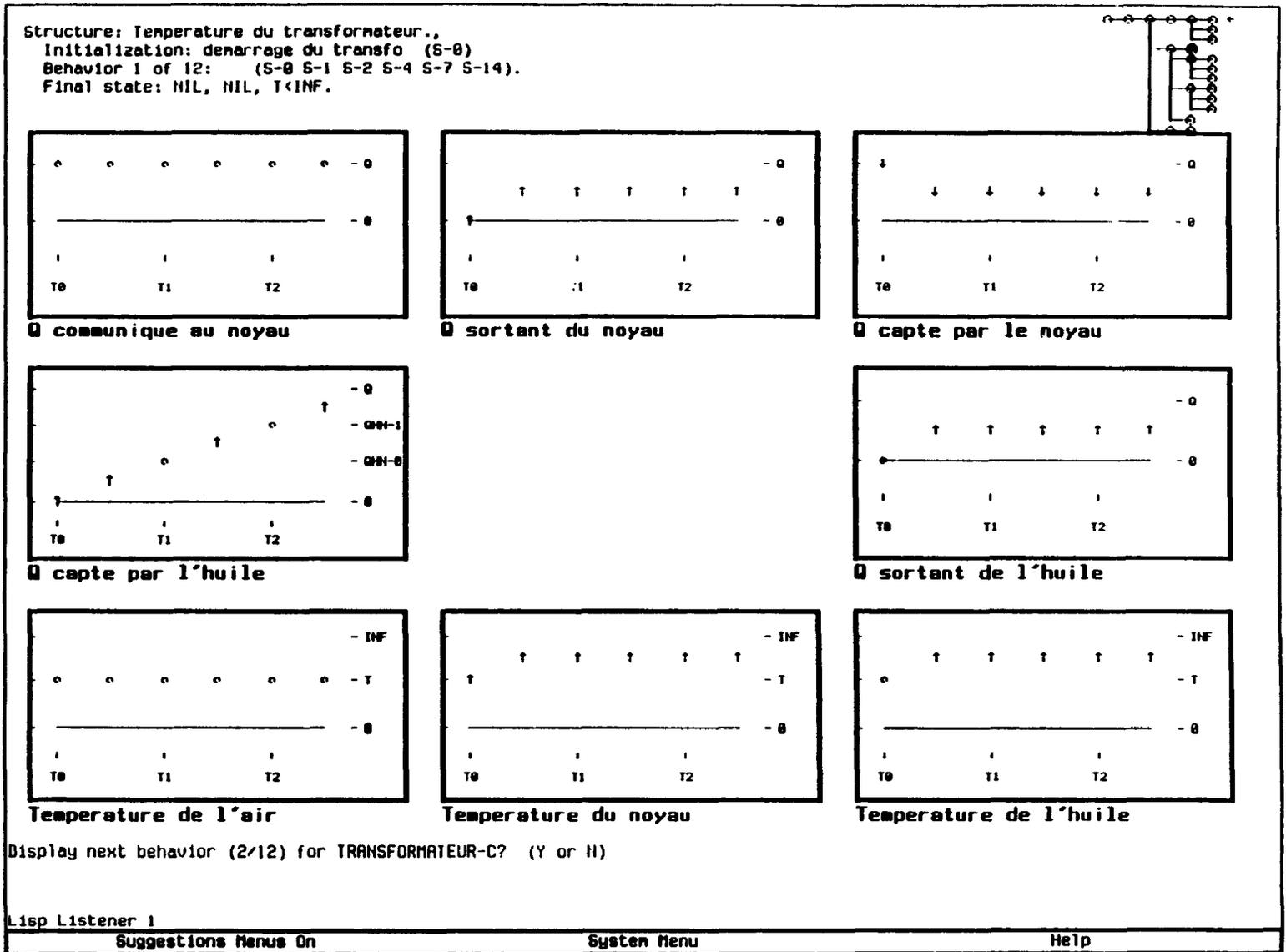


Figure 5.6 b) Deuxième résultat de la simulation du comportement thermique du transformateur

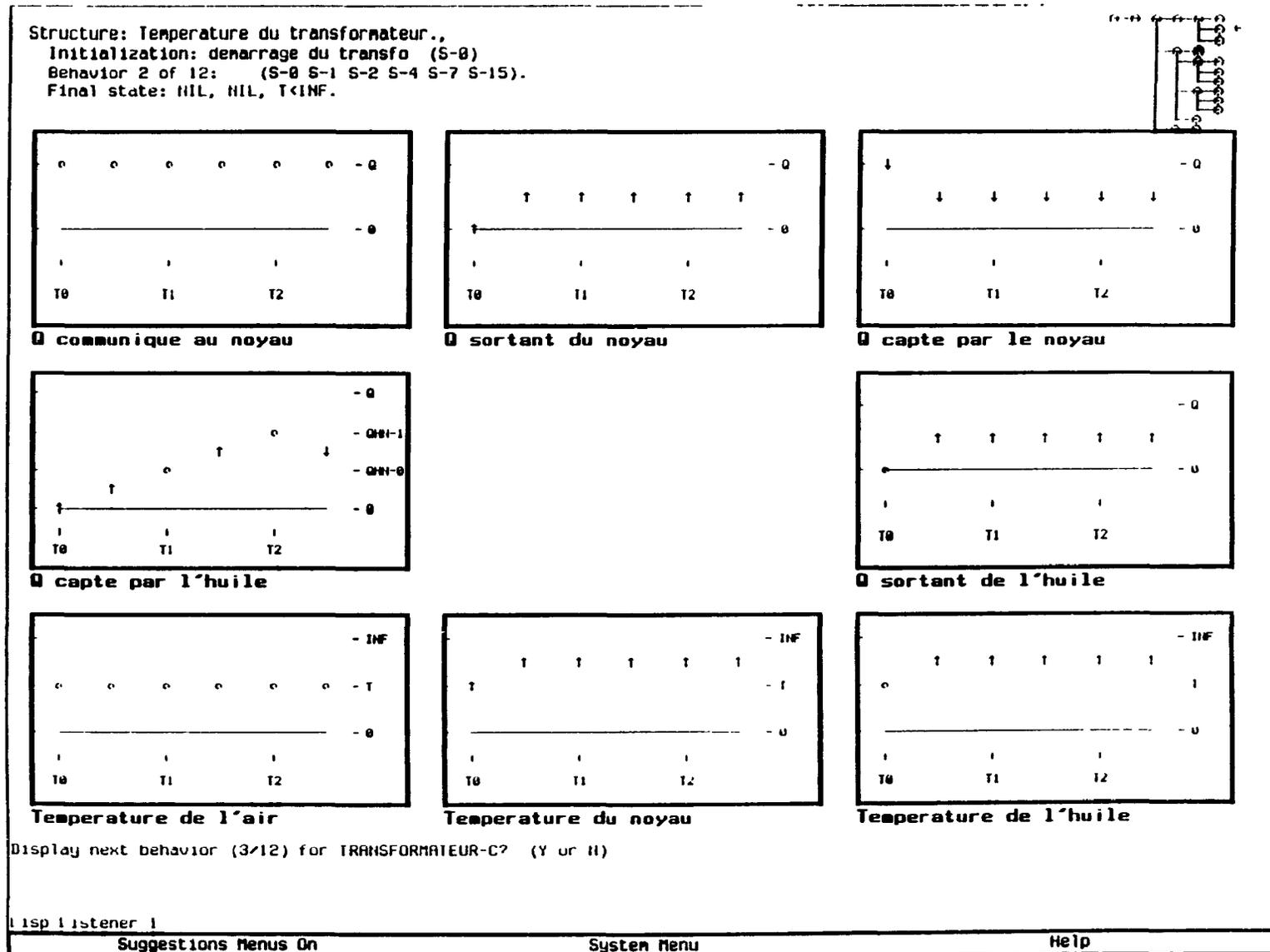


Figure 5.6 c) Troisième résultat de la simulation du comportement thermique du transformateur

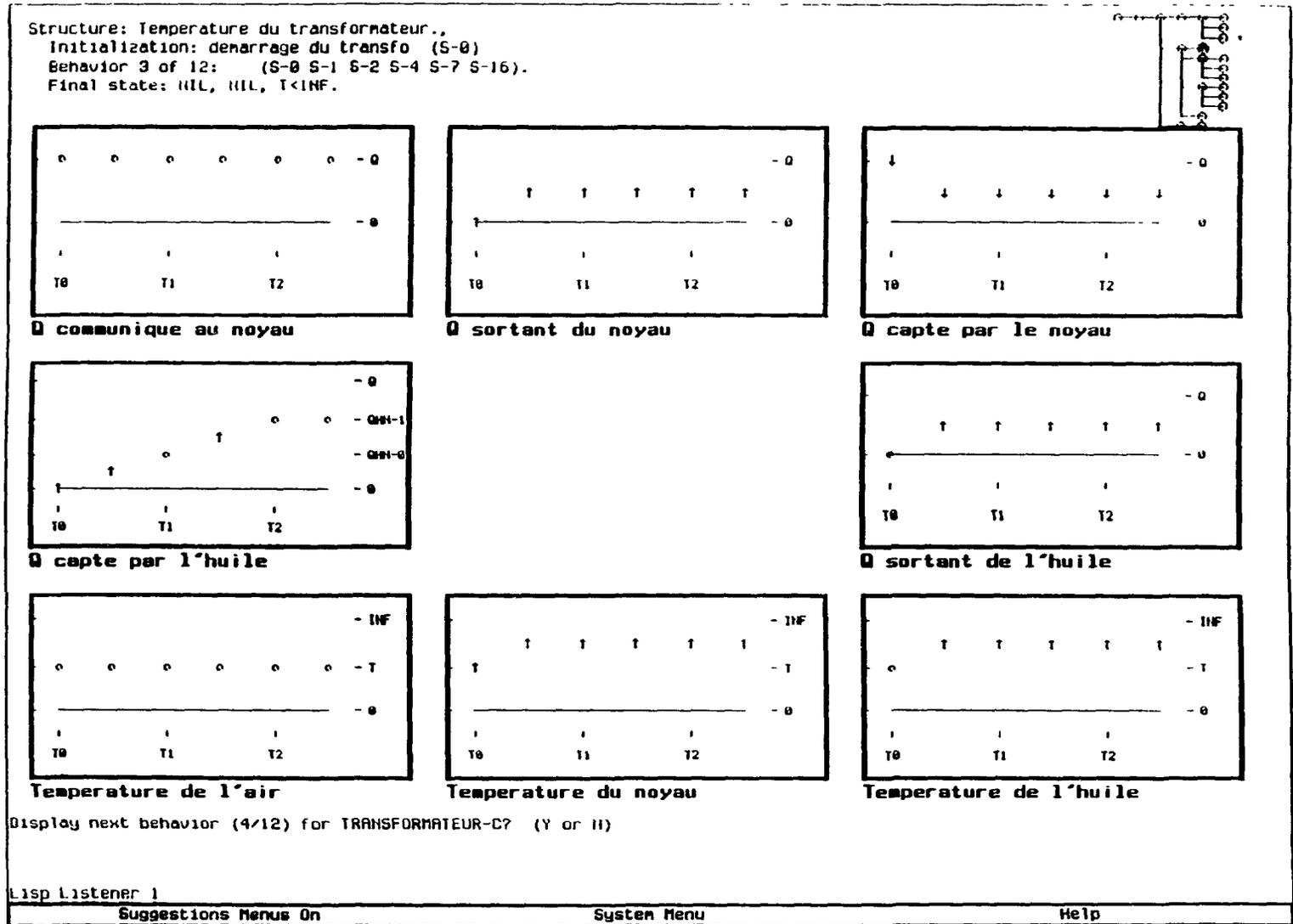


Figure 5.6 d) Quatrième résultat de la simulation du comportement thermique du transformateur

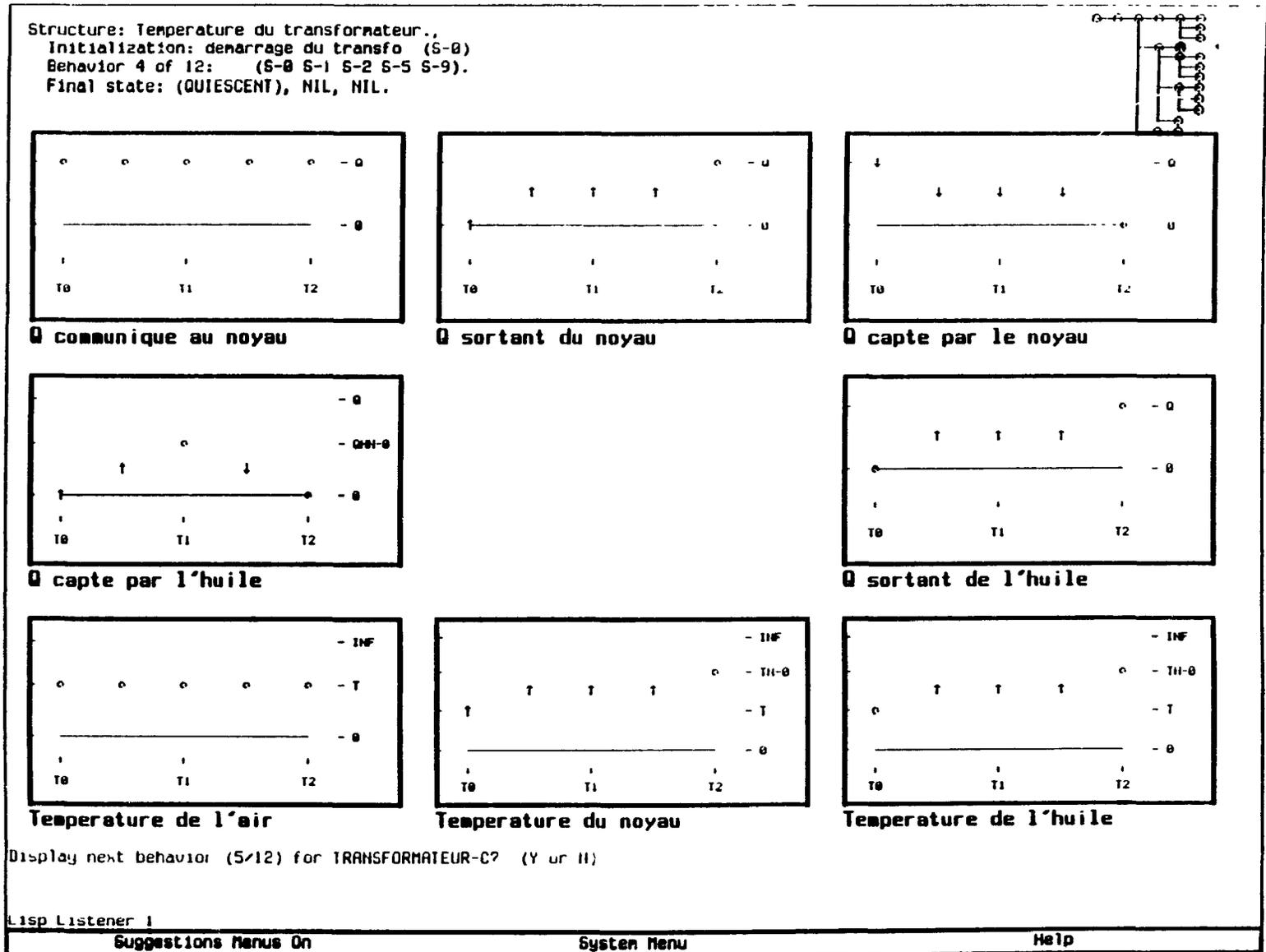


Figure 5.6 e) Cinquième résultat de la simulation du comportement thermique du transformateur

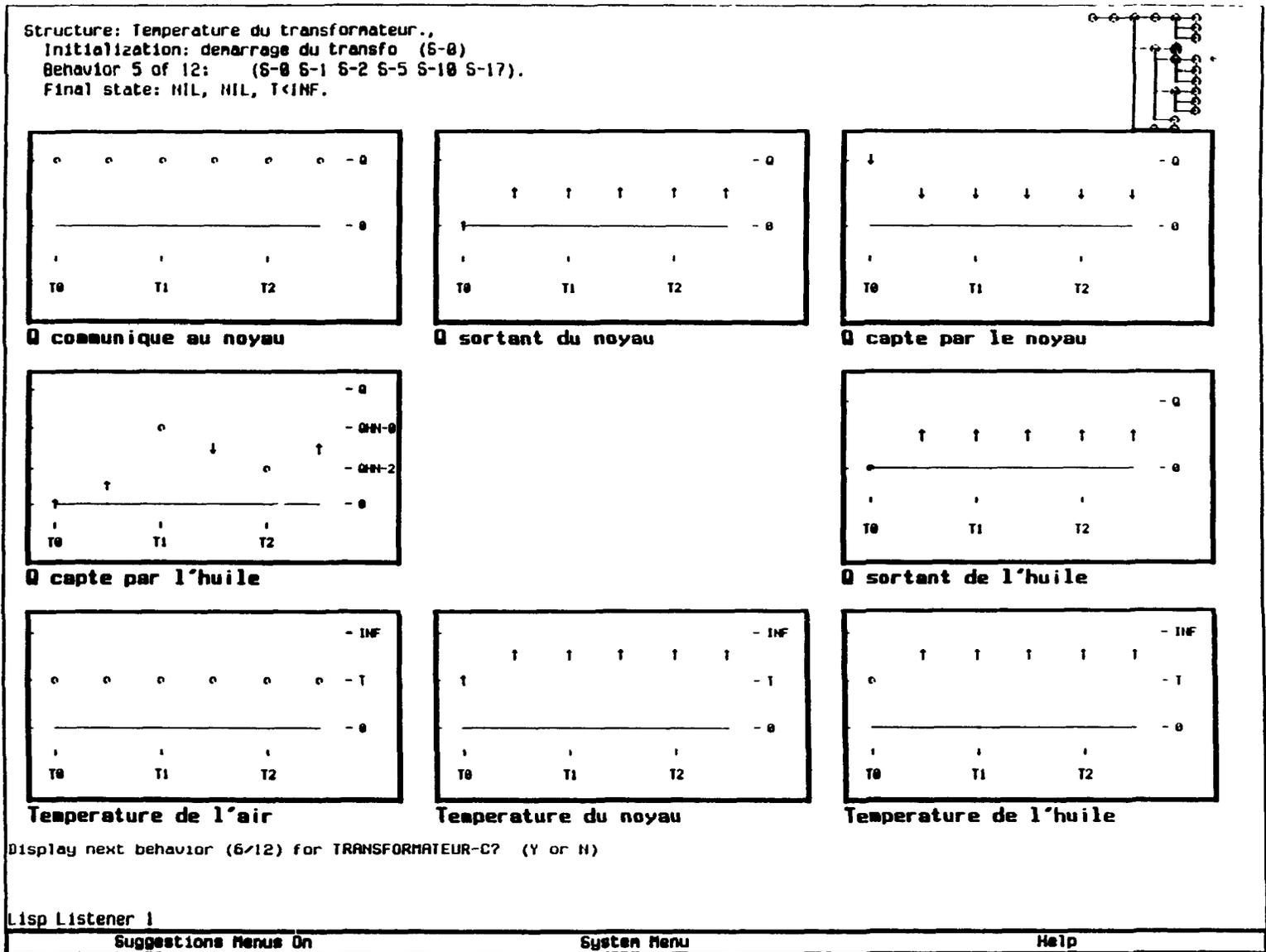


Figure 5.6 f) Sixième résultat de la simulation du comportement thermique du transformateur

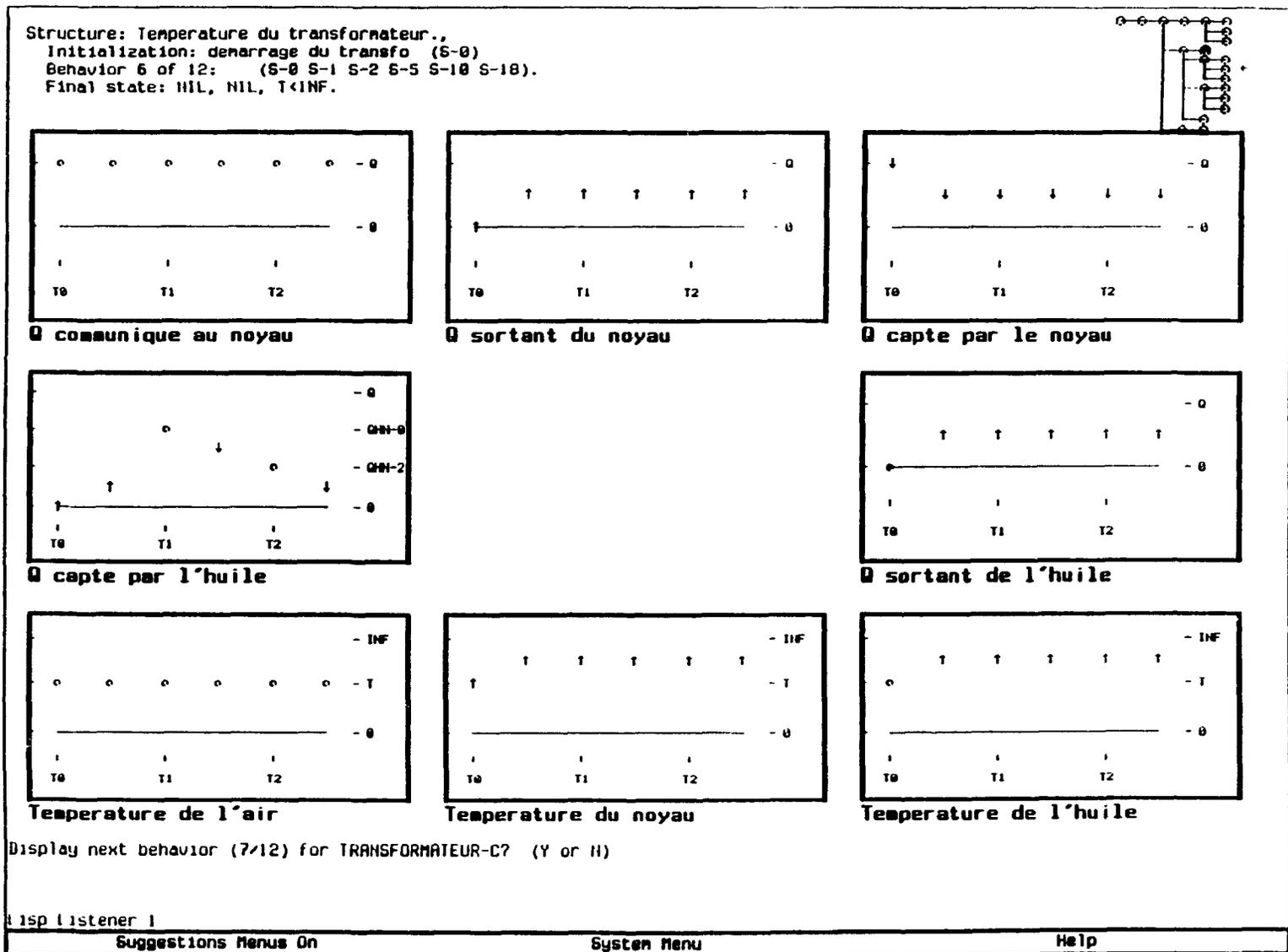


Figure 5.6 g) Septième résultat de la simulation du comportement thermique du transformateur

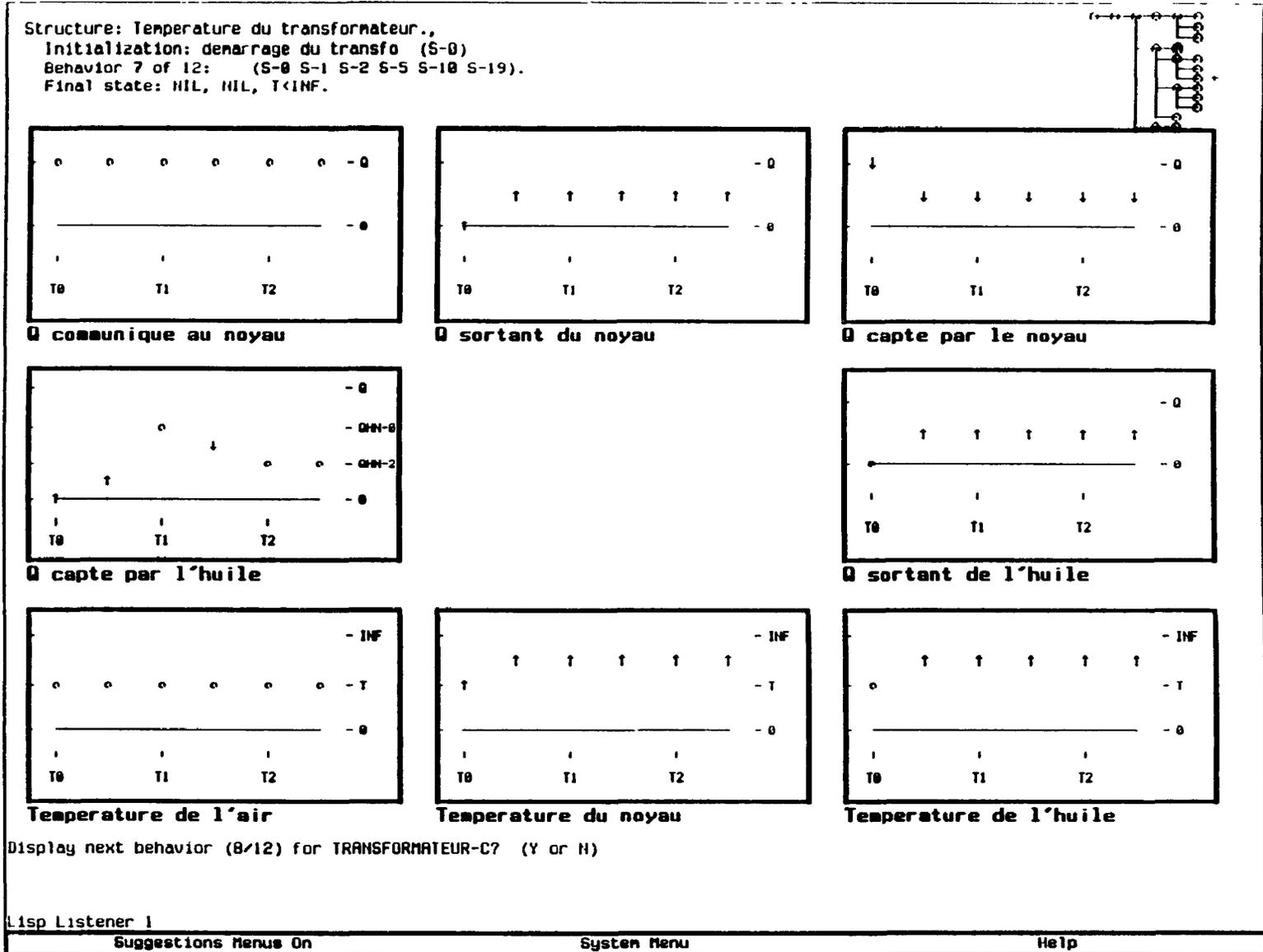


Figure 5.6 h) Huitième résultat de la simulation du comportement thermique du transformateur

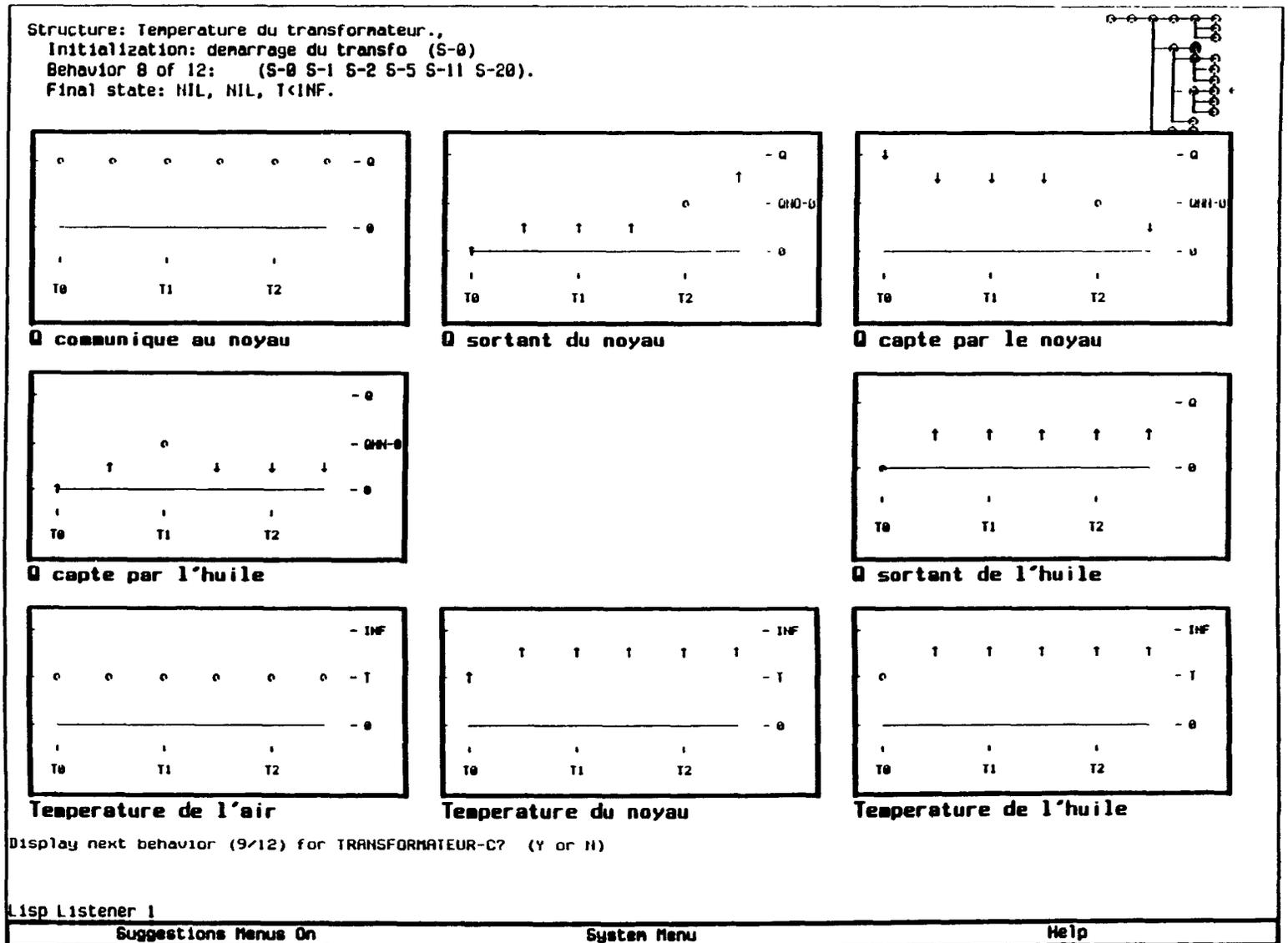


Figure 5.6 i) Neuvième résultat de la simulation du comportement thermique du transformateur

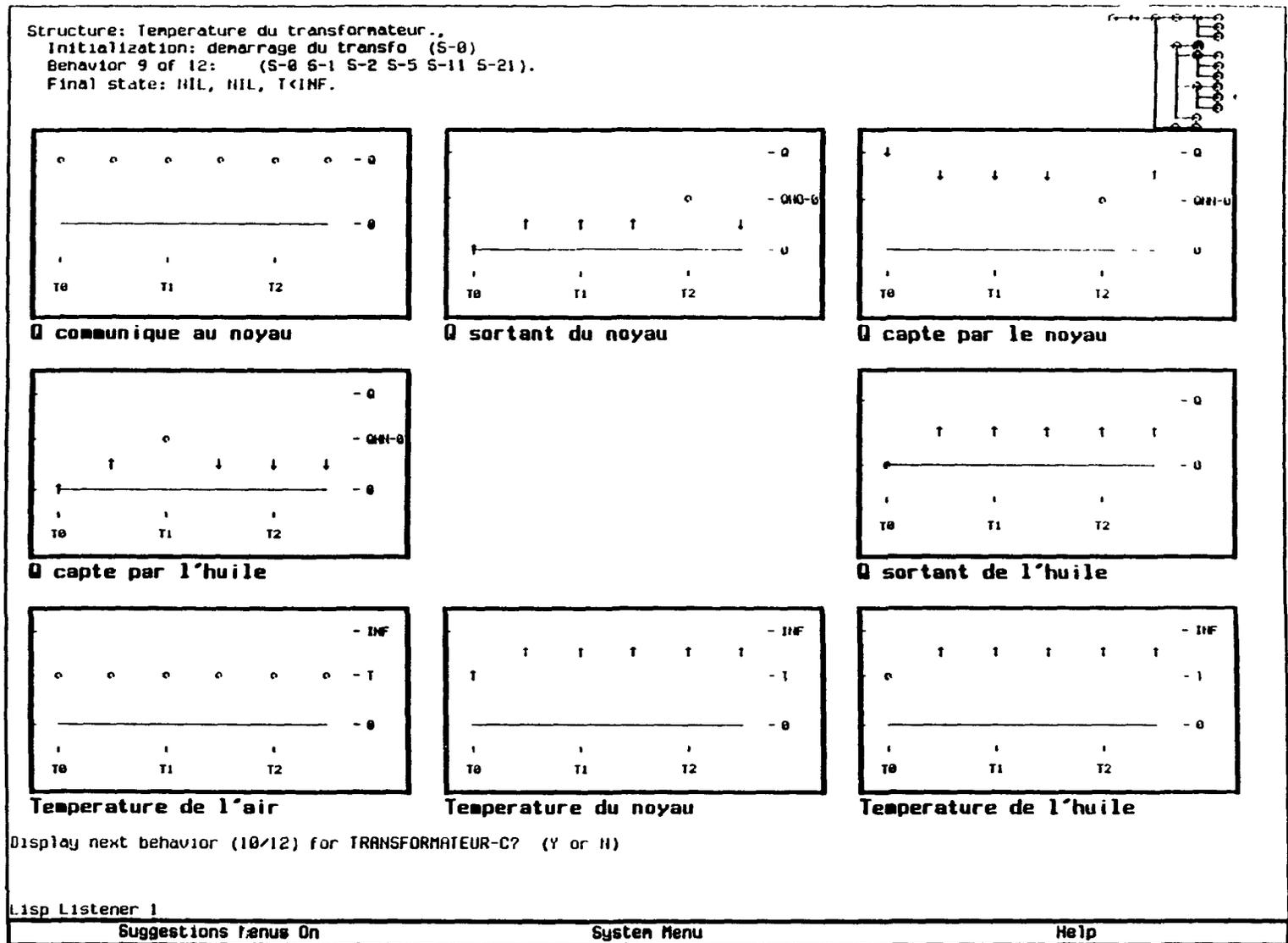


Figure 5.6 j) Dixième résultat de la simulation du comportement thermique du transformateur

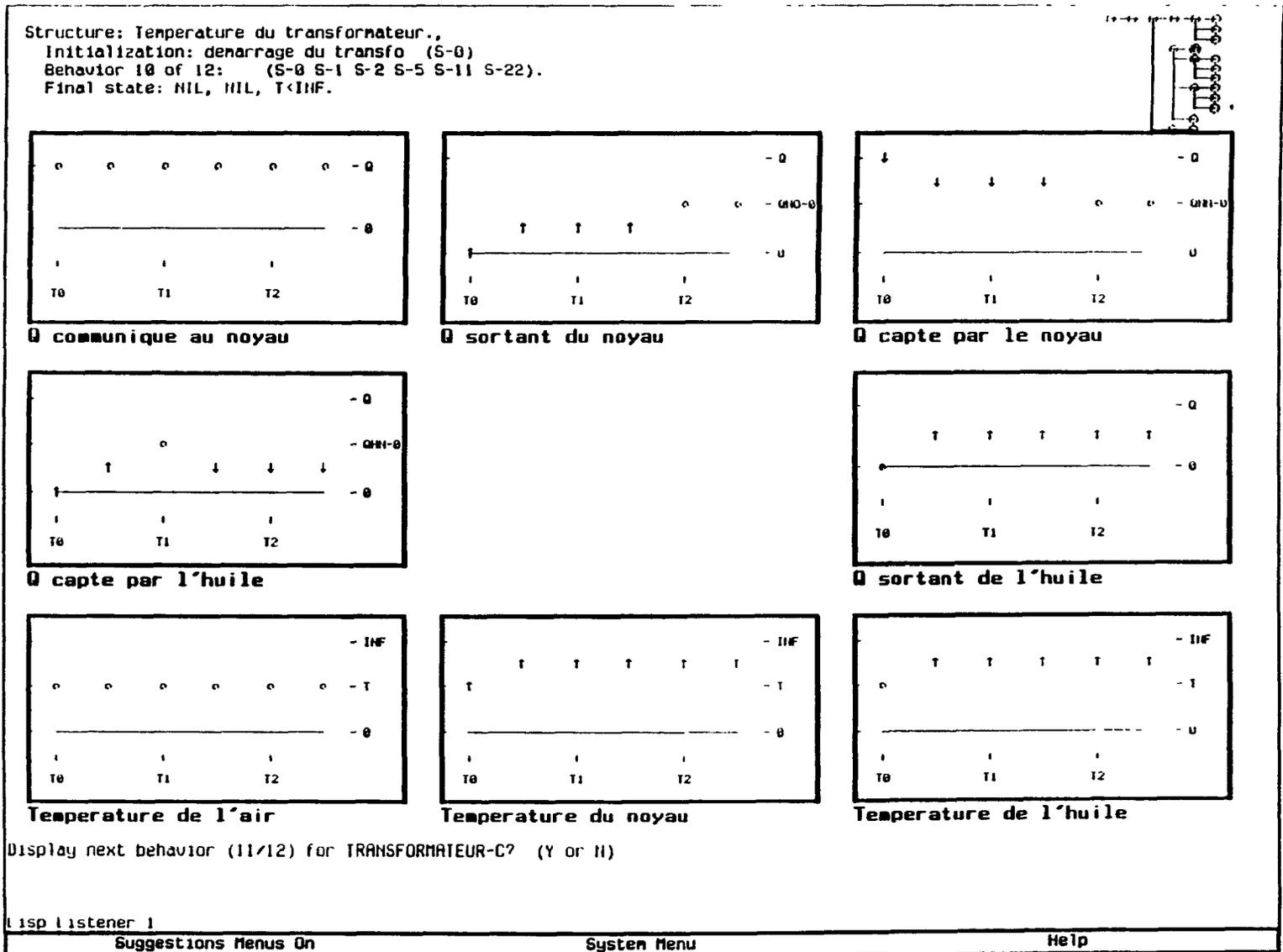


Figure 5.6 k) Onzième résultat de la simulation du comportement thermique du transformateur

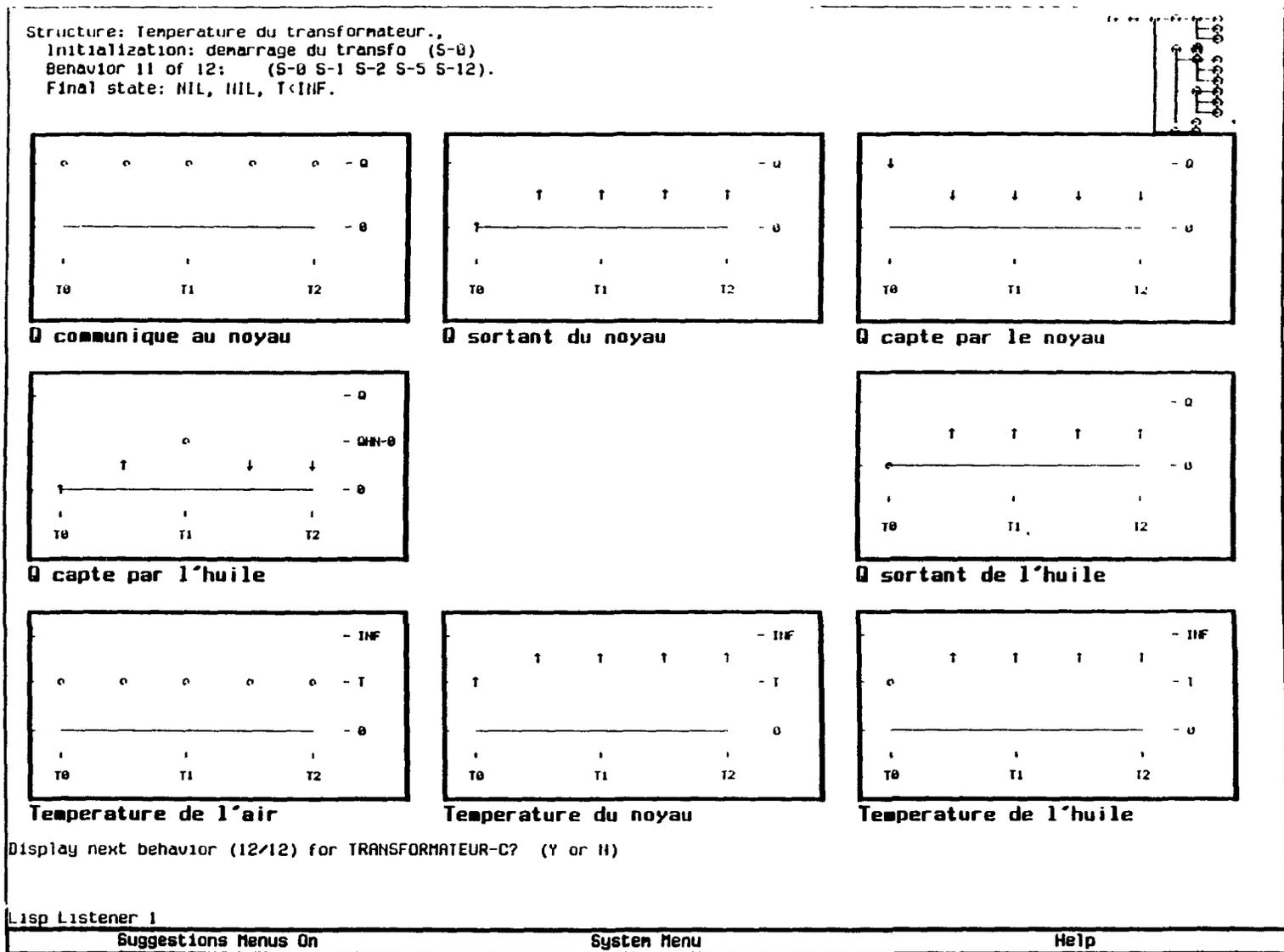
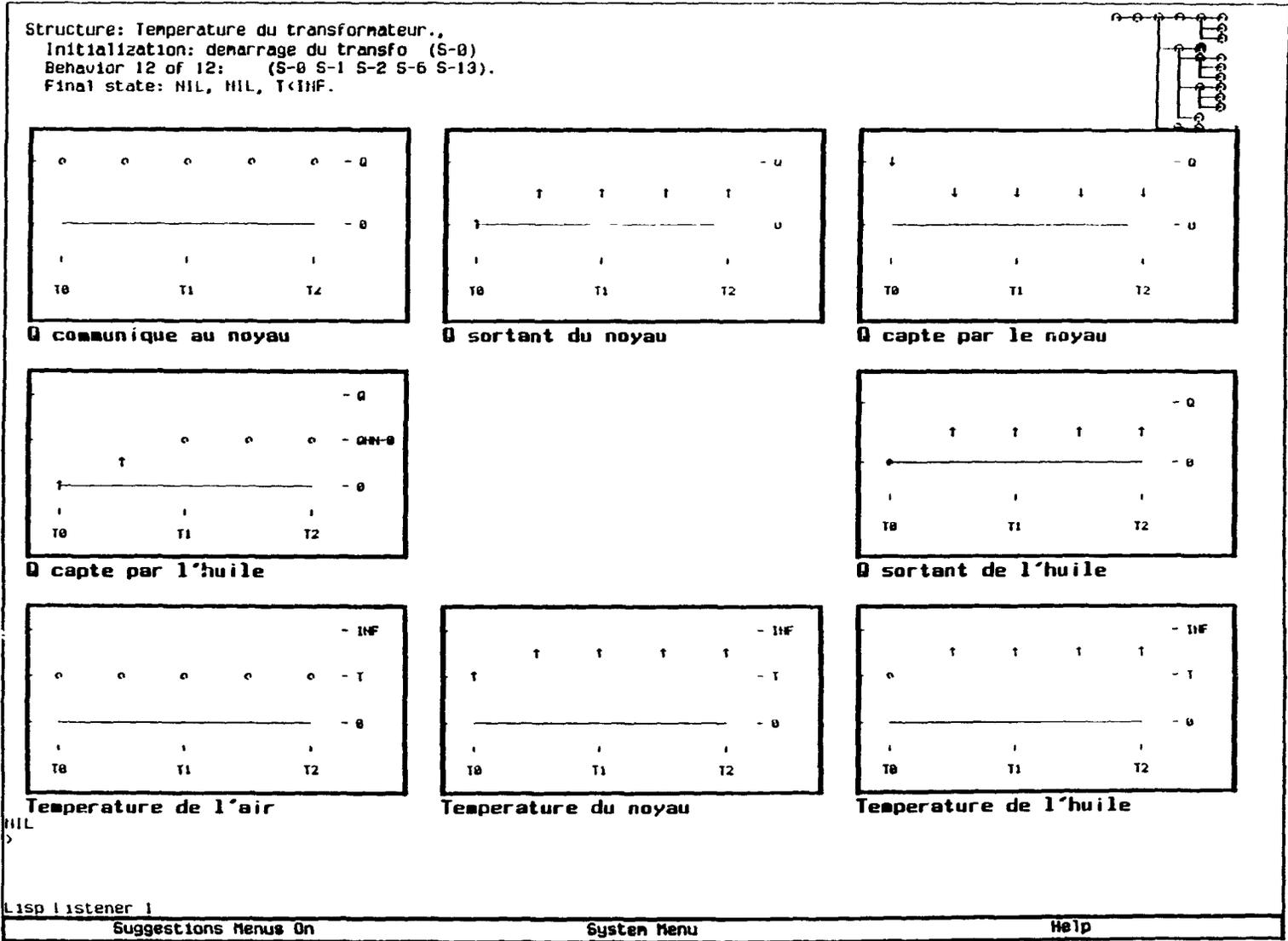


Figure 5.6 1) Douzième résultat de la simulation du comportement thermique du transformateur



La simulation qualitative réalisée à l'aide de Q que nous venons de présenter aboutit à douze comportements possibles. Cela est dû à des insuffisances du logiciel qui ne conduit pas d'analyse sur les dérivées de deuxième ordre et qui ne permet pas d'interpréter des comportements asymptotiques. Nous présentons ci-dessous une analyse qualitative qui pourrait être automatisée et qui réduirait l'ensemble des solutions aux résultats des figures 5.6 d) et 5.6 k) qui sont les comportements réellement possibles que pourrait avoir la température de l'huile du transformateur. Dans le cas de la figure 5.6 d), la valeur limite est atteinte directement et dans le cas de la figure 5.6 k), elle est atteinte asymptotiquement.

À $t = 0$, on introduit un courant I dans les enroulements. Q_N in prend aussitôt une valeur positive. D'autre part, la température de l'huile, du noyau et des enroulements est celle de l'air: $T_N = T_H = T_A$. Donc Q_N out est nul ainsi que Q_H out, Q_H net aussi et Q_N net = Q_N in.

Juste après $t = 0$, étant donné que Q_N net > 0 , T_N va augmenter. Comme nous ne savons pas encore comment T_H se comporte, il y a trois possibilités:

1. $T_N - T_H < 0$. Ce qui n'est pas possible car on aurait: Q_N out < 0 et Q_H out > 0 car $T_H > T_N > T_A \implies Q_H$ net < 0 . Or si $T_H > T_N$, on devrait avoir Q_H net > 0 .
2. $T_N - T_H = 0$. Par un raisonnement similaire ce cas est exclu aussi.
3. $T_N - T_H > 0$. Ceci entraîne Q_N out > 0 , Q_H net > 0 , Q_H out > 0 et Q_N net décroissant. Ce cas est le seul consistant et par conséquent est le bon.

Nous devons maintenant examiner s'il existe des points critiques qui vont découler de cet état. Q_N net est positif et Q_N in est constant donc Q_N out et $T_N - T_H$ sont bornés. Soit ils vont atteindre directement leur limite de façon strictement monotone, soit ils auront leur dérivée nulle avant cela, ce qui se traduit par un extremum ou un point d'inflexion.

Supposons que Q_N out ait sa dérivée nulle à t_1 et n'ait pas atteint sa limite. Alors Q_N net est constant et positif puisque qu'on se situe avant la limite Q_N out. Cela implique que la dérivée de T_N est positive et la dérivée seconde de T_N est nulle. D'autre part, si la dérivée de Q_N out est nulle alors Q_H out est croissant et Q_H net est décroissant. Ceci se justifie toujours avec un raisonnement par l'absurde. Donc T_H est croissant mais sa dérivée seconde négative. Par conséquent, la dérivée seconde de $T_N - T_H$ et de Q_N out sont positives. Or à t_1 , la dérivée de $T_N - T_H$ passait d'une valeur positive à une valeur nulle, la dérivée seconde de $T_N - T_H$ aurait donc dû être négative ou nulle à t_1 . D'après cette contradiction nous en déduisons que Q_N out ne peut avoir sa dérivée nulle que lorsqu'elle atteint sa limite et qu'elle y arrivera de façon strictement monotone.

$T_N - T_H$ atteint donc directement ou asymptotiquement sa limite, sa dérivée devient nulle. Encore une fois en élagant l'arbre des possibilités, nous en arrivons à la déduction que les dérivées de T_H et de T_N deviennent nulles directement ou asymptotiquement. Donc Q_N net et Q_H net vont finir par s'annuler. Étant donné que juste après $t = 0$, Q_H net croissait et était positif, il a fallu que Q_H net atteigne un maximum avant de décroître pour revenir à 0. Ce maximum est une valeur singulière pour Q_H net qui a été créée au cours de l'analyse.

Ceci explique pourquoi cinq points temporels distincts sont différenciés: l'instant initial, l'intervalle de temps où QH net est croissant, l'instant où QH net atteint son maximum, l'intervalle où QH net est décroissant et l'instant final dans le cas où la température limite est atteinte.

Bien que l'analyse approfondie ne laisse que deux comportements voisins possibles (limite atteinte directement et asymptotiquement), les commentaires précédents restent valables. Le fait de ne pouvoir situer la valeur limite par rapport à la valeur critique de la température du transformateur subsiste et l'inconvénient des résultats multiples et contradictoires se pose néanmoins pour d'autres systèmes car il est inhérent à la modélisation.

5.1.5 Limitations de l'application des modèles qualitatifs au diagnostic d'appareils électriques

5.1.5.1 Ambiguïtés des résultats

La première limitation de l'application des modèles qualitatifs au diagnostic est que la simulation d'une hypothèse peut conduire à plusieurs résultats. Nous sommes assurés de trouver parmi ces résultats le bon mais nous n'avons pas de moyen de le reconnaître. Cette ambiguïté empêche de valider ou d'infirmer l'hypothèse et par conséquent l'utilisation du modèle qualitatif n'a servi à rien.

Dans l'exemple que nous avons étudié au chapitre précédent, l'ambiguïté provenait de l'outil de simulation Q qui ne traite pas les dérivées d'ordre deux. Mais cette ambiguïté peut provenir directement de l'algèbre qualitative comme nous l'avons remarqué dans le tableau 5.1 a) (p. 34). Dans ce cas, il peut être évité en choisissant des espaces-Q plus fins comme le font De Mori et Prager [De Mori et Prager, 1989] avec l'espace-Q D bien que les valeurs qualitatives qui résultent des opérations sont moins précises que les valeurs initiales. L'ambiguïté des résultats provient aussi du fait qu'il n'est pas possible de situer une valeur qualitative par rapport à une valeur donnée. Dans l'exemple du démarrage du transformateur, nous avons vu que la température de l'huile allait atteindre une limite qu'il n'était pas possible de situer par rapport à la valeur de déclenchement de l'alarme de

température. De Kleer et Brown et Forbus donnent dans les publication mentionnées des exemples de prédiction de comportement de systèmes qui résultent en plusieurs solutions.

5.1.5.2 Génération des hypothèses

L'utilisation des modèles qualitatifs dans le diagnostic consiste à vérifier des hypothèses. Si nous n'avons pas abordé le problème de la génération de ces hypothèses jusqu'à présent, il s'agit pourtant d'un point essentiel de la chaîne du raisonnement du diagnostic.

Des travaux sur l'utilisation des modèles qualitatifs en diagnostic [Kuipers, 1987a] [Dague et al., 1986] utilisent l'heuristique pour générer des hypothèses de pannes. Or, une limitation des systèmes experts basés sur la connaissance de surface était de n'envisager que les cas préalablement décrits dans la base de connaissances et l'avantage attendu de l'approche profonde sur l'approche heuristique est de considérer toutes les causes possibles d'une panne, connaissant sa structure et son fonctionnement.

On pourrait penser aussi se servir des modèles qualitatifs pour générer les hypothèses. Une première idée consisterait à les générer de façon exhaustive en considérant les valeurs possibles des paramètres comme le fait Pearce [Pearce, 1988], qui se sert des modèles qualitatifs pour générer un ensemble complet de règles heuristiques pour traiter des pannes possibles d'un système. Mais pour de gros systèmes, le nombre d'hypothèses à valider serait trop grand pour qu'elles soient toutes traitées. Ce nombre pourrait être réduit en ne gardant que les paramètres significatifs; néanmoins le pourcentage d'hypothèses inutiles resterait trop grand. Afin d'élaguer davantage ce nombre il faudrait pouvoir exploiter les relations de causalité, ce que ne font pas les modèles qualitatifs. Nous discuterons en détail de ce dernier argument dans la section suivante. En effet, l'équation qualitative $A = B + C$ nous amènerait à considérer B et C comme cause de la valeur anormale de A alors qu'il se pourrait qu'un seul des deux soit une cause valable. D'autre part, le nombre de valeurs des paramètres est grand mais fini dans le cas d'espaces-Q finis, mais nous rappelons qu'une hypothèse peut porter sur la transformation d'équations qualitatives et alors les possibilités sont presque infinies. Pour ces raisons, il semblerait que les modèles qualitatifs ne puissent pas servir à générer automatiquement les hypothèses.

5.1.5.3 Discrimination des candidats

Il se peut qu'après l'étape de vérification des hypothèses, il y en ait plusieurs qui soient validées. Le diagnostic doit alors se poursuivre pour éliminer celles qui ne correspondent pas à la réalité. Une information supplémentaire sur le système doit être acquise afin de procéder à cette sélection et il faudra décider des tests à entreprendre. Si une hypothèse validée par la simulation qualitative est confirmée par une mesure, il se peut que l'utilisateur juge l'explication satisfaisante et les autres hypothèses valides ne seront alors pas considérées. Ou encore, si une hypothèse implique des conséquences particulièrement néfastes, il faudra lui accorder une priorité dans le choix des tests. Il faudra donc aussi décider de l'ordre des tests.

Or les modèles qualitatifs sont seulement utilisés pour vérifier les hypothèses émises; ils n'ont pas d'application dans la sélection de celles qui sont validées afin que leur pertinence à la réalité soit évaluée. Ils n'interviennent donc pas à la dernière étape du diagnostic, ce qui constitue une autre limitation.

5.1.5.4 Complexité de la simulation

Nous n'avons utilisé que des modèles simples dans notre étude. La modélisation de tout un appareil et la prise en compte d'un niveau de détail qui correspond à l'information utile dans la réalité peut conduire à des modèles beaucoup plus complexes. Dans l'exemple simplifié dont nous nous sommes servis pour illustrer la méthode de Kuipers, les calculs qualitatifs étaient déjà complexes. Nous imaginons aisément que pour des modèles plus complets, l'analyse se heurte à une complexité qu'elle ne peut traiter. Les temps de calculs seraient extrêmement longs et le problème des ambiguïtés serait aggravé.

Le raisonnement qualitatif est donc un instrument qui présente des caractéristiques intéressantes pour pallier les inconvénients d'un raisonnement quantitatif mais il est confronté à de sérieuses limitations. Il peut être utile dans le cas de systèmes particuliers qui sont simples et dont le modèle ne comporte pas de calculs aboutissant à des ambiguïtés mais ce n'est pas le cas de la plupart des appareils électriques.

5.2 Les systèmes experts basés sur les réseaux causaux

5.2.1 Intérêt des réseaux causaux

L'utilisation des modèles qualitatifs en diagnostic présente des limitations qui motivent la recherche d'une autre approche. En effet, les modèles qualitatifs servent à simuler des hypothèses sur la cause d'une panne afin de les vérifier et l'ambiguïté des résultats empêche d'effectuer cette vérification. D'autre part, les modèles qualitatifs n'adressent pas le problème de génération des hypothèses et de sélection des hypothèses valides et posent aussi des problèmes de temps de calculs pour des systèmes complexes. Il semble dès lors nécessaire de trouver une autre méthode qui puisse traiter le diagnostic par l'approche profonde.

Le raisonnement humain s'appuie sur les rapports de causalité entre éléments d'un système pour faire du diagnostic. Or cette causalité n'est pas exprimée explicitement dans les modèles qualitatifs sauf dans la méthode de Forbus où la description des influences identifient les causes des processus. La loi de Joule $P = R * I^2$, qui se transcrit en l'équation qualitative $P = R * I$, n'exprime pas que le courant est la cause de la dissipation de puissance.

Selon De Kleer et Brown [De Kleer et Brown, 1984], la causalité se déduit lors de la résolution des confluences. C'est-à-dire que lorsque la valeur d'un paramètre permet d'évaluer la valeur d'autres paramètres, ils considèrent que le premier est la cause des autres. Iwasaki et Simon [Iwasaki et Simon, 1986a], prennent une autre approche pour trouver la causalité à partir de la description fonctionnelle. Ils dérivent des sous-ensembles d'équations minimaux et complets, qui comprennent autant de variables que d'équations et qui n'incluent pas de sous-ensembles ayant cette même propriété, de l'ensemble initial des équations caractérisant le fonctionnement du système pour établir l'ordre de causalité des paramètres. L'ordre de la résolution du système est guidé par la constitution progressive des sous-ensembles d'équations minimaux et complets et détermine la causalité des paramètres du système. La causalité définie par De Kleer et Brown est dérivée du calcul du comportement, et celle définie par Iwasaki et Simon est dérivée des équations fonctionnelles par des techniques algébriques. La différence des deux approches et le fait qu'elles aboutissent à des résultats différents sont bien soulignés [De Kleer et Brown,

1986] [Iwasaki et Simon, 1986a] [Iwasaki et Simon, 1986b] et cela renforce le doute que les modèles qualitatifs n'expriment pas non plus implicitement les relations causales d'un système.

Il semble dès lors intéressant de considérer des modèles qui expriment précisément les relations causales d'un système. Van de Velde [Van de Velde, 1985] traite justement le diagnostic uniquement par la description des relations causales entre propositions qui représentent l'état des paramètres. Nous appellerons ce type de modèles les réseaux causaux.

Les réseaux causaux peuvent être considérés comme des modèles qualitatifs simples dont la seule information représentée est la causalité entre paramètres. Les valeurs des paramètres sont "normal" et "anormal" seulement, les autres valeurs qualitatives ne sont pas considérées. Les réseaux causaux sont donc complémentaires par rapport aux modèles qualitatifs présentés au chapitre précédent.

Cette section s'intéresse à l'utilisation des réseaux causaux en diagnostic. Nous décrirons tout d'abord les réseaux causaux. Nous verrons ensuite comment les utiliser pour le diagnostic. Ici, nous reprendrons les travaux de Van de Velde. Puis nous nous consacrerons à leur acquisition, ce qui sera une des contributions majeures de cette thèse. Nous illustrerons cette approche par un exemple d'application à un appareil électrique, le transformateur. Finalement, nous comparerons l'utilisation des réseaux causaux et des modèles qualitatifs en diagnostic et nous justifierons qu'elle est généralisable à tous les appareils électriques et à d'autres types de systèmes.

5.2.2 Description des réseaux causaux

Les réseaux causaux représentent les liens de causalité entre les paramètres d'un système. Van de Velde [Van de Velde, 1985] s'en est servi pour effectuer du diagnostic et nous reprenons son exemple comme illustration à la figure 5.7.

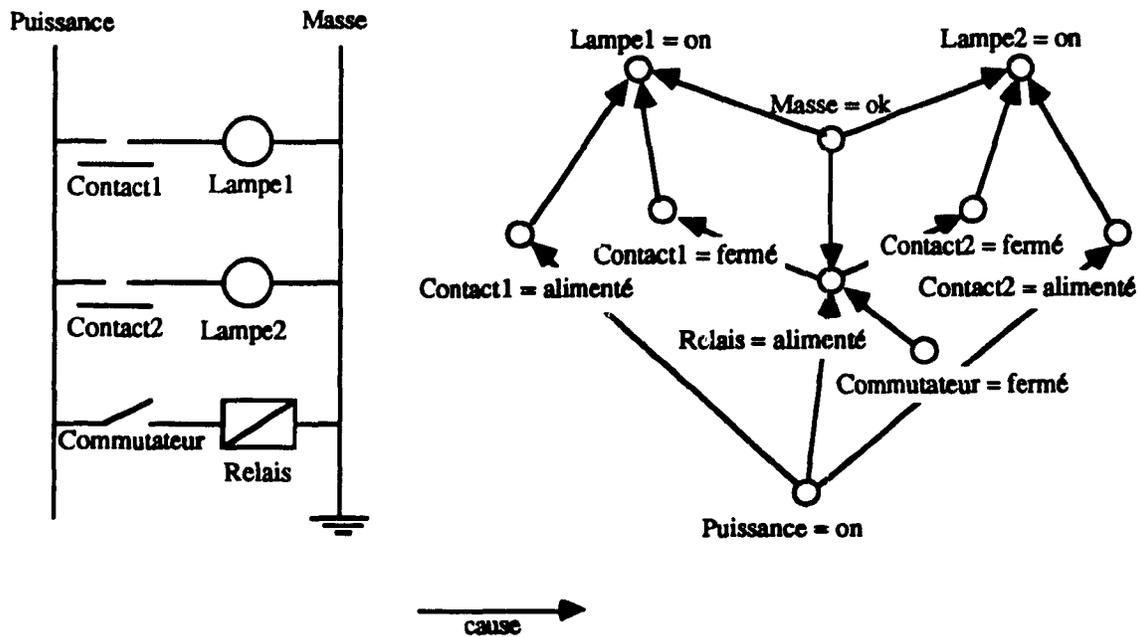


Figure 5.7 Réseau causal d'un système d'éclairage simple

Lorsque le commutateur est fermé, le relais est alimenté et va fermer les contacts 1 et 2. Le courant pourra alors circuler dans les lampes pour les éclairer.

Dans cet exemple les nœuds du réseau causal sont des propositions du style "Puissance = on", c'est-à-dire des états particuliers des composants. Dans d'autres cas, il peut s'agir aussi de paramètres dont les valeurs ne sont pas nécessairement exprimées comme nous le verrons dans l'exemple présenté plus loin.

La causalité est une relation transitive. Si A cause B et que B cause C alors A cause aussi C. Il en résulte qu'un élément peut être sa propre cause dans le cas d'une boucle puisque si C cause A, alors par transitivité A cause A.

Certaines relations de causalité dépendent du temps. C'est le cas notamment de réactions chimiques: le sel met du temps à provoquer la rouille sur des voitures. Les effets d'un élément ne sont donc pas toujours immédiats. Des relations de causalité "lentes" pourraient être décrites et le raisonnement pourrait en tenir compte. Kuipers [Kuipers, 1987a] mentionne cet aspect temporel des relations qualitatives et propose que les éléments

de l'évolution lente soient considérés constants pendant que ceux de l'évolution rapide se produisent.

On pourrait considérer un autre type de causalité qui consiste à cumuler les influences dans le temps et dont le cumul de variations serait responsable de l'effet. Ceci implique que lorsque la variation se produit, l'effet n'est pas nécessairement observé et que lorsque que l'effet est observé, sa cause n'est pas forcément présente. Par exemple, un pneu de voiture peut éclater dans des conditions normales s'il a subi de nombreuses ou fortes contraintes auparavant. Le temps peut donc être un facteur significatif dans les relations de causalité et pourrait être pris en compte.

5.2.3 Utilisation des réseaux causaux en diagnostic

La méthodologie du diagnostic à l'aide de réseaux causaux suit une approche similaire à celle utilisée par Davis [Davis, 1984]. Elle est reportée à la figure 5.8.

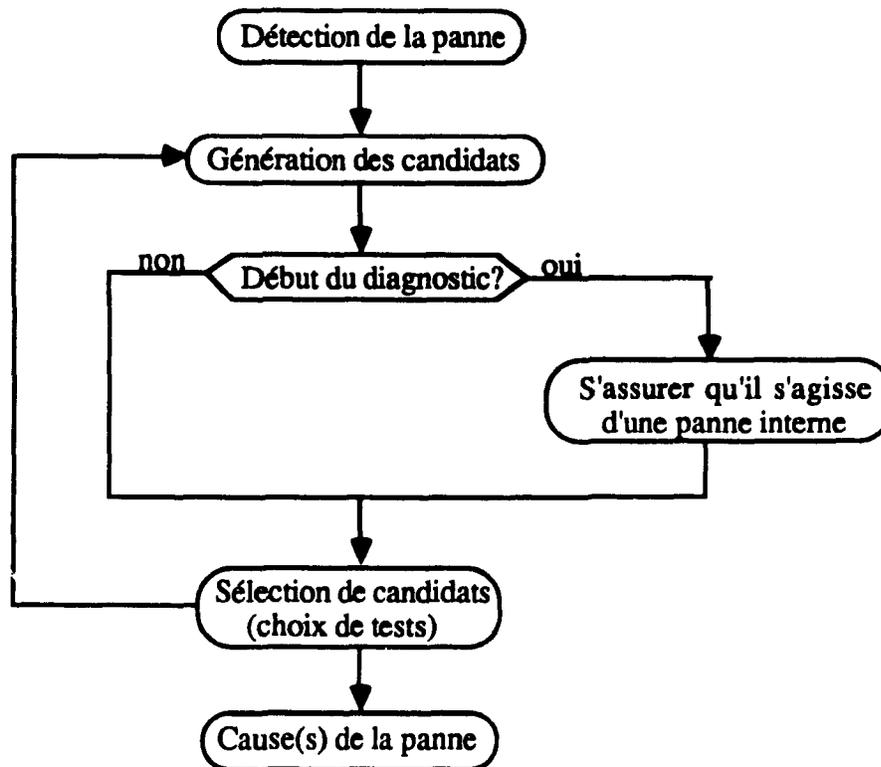


Figure 5.8 Méthodologie du diagnostic à l'aide de réseaux causaux

Une fois qu'une panne est détectée, il faut dépister sa source. Pour cela, des candidats sur l'explication de la panne sont générés à partir d'observations. Van de Velde fournit un algorithme dans ce but qui s'appuie sur les réseaux causaux. Nous présentons brièvement le formalisme qu'il utilise.

Les éléments du réseau causal sont associés aux valeurs (normal, anormal). p étant un élément du réseau causal, $-p$ désigne les éléments qui sont une cause directe de p , c'est-à-dire sans user de la transitivité, et $p-$ les éléments qui ont pour cause p ou encore qui sont les effets de p .

On dit qu'un élément p ne fonctionne pas lorsque tous les éléments de $-p$ sont normaux et que p est anormal ou encore lorsqu'au moins un élément de $-p$ est anormal et que p est normal. Les observations de départ fournissent la valeur de quelques éléments du réseau et par propagation de ces valeurs dans le réseau, un ensemble de candidats est généré pour la panne.

Dans l'exemple de Van de Velde de la figure 5.7 (p. 65), le commutateur est fermé et la lampe 2 ne s'allume pas contrairement à la lampe 1. L'algorithme en déduit automatiquement que la lampe 2 ne fonctionne pas ou que le contact 2 n'est pas fermé ou qu'il n'est pas alimenté. Le détail de cette méthode est présenté dans [Van de Velde, 1985]. Nous nous servons des travaux de Van de Velde pour réaliser la génération des candidats.

Une fois que l'ensemble des candidats est généré, il faut les sélectionner. Parmi les candidats figurent des paramètres exogènes. Il se peut que le comportement anormal du système soit causé par des conditions d'opération anormales et alors le système serait néanmoins en bon état. Il est donc judicieux de s'attacher dans un premier temps aux candidats exogènes. Si les candidats exogènes sont normaux, alors on conclut à une panne interne qu'on s'efforcera de dépister.

Dans le cas où la panne est interne au système, il est nécessaire d'acquérir de l'information supplémentaire sur des éléments du réseau causal par des tests. Le choix de ces tests repose sur plusieurs facteurs. Tout d'abord, les tests sont associés à des coûts différents. Pour un transformateur, la vérification du débit d'huile dans le circuit de refroidissement se fait par une simple lecture d'un capteur alors que la mesure de l'état de l'isolant des enroulements nécessite l'arrêt du transformateur et son ouverture. Le coût d'un

test sera un facteur dans la décision d'acquiescer la valeur d'un candidat plutôt qu'un autre. Les tests les plus onéreux pourront être réalisés en dernier lieu s'ils s'avèrent nécessaires.

La théorie de l'information peut aider à rendre efficace la sélection de candidats. Connaissant la fiabilité des composants, les éléments ont des probabilités plus ou moins fortes d'être responsables de la panne. De Kleer et Williams [De Kleer et Williams, 1987] ont étudié ce problème d'exploitation des probabilités de pannes pour choisir le test le plus efficace dans le domaine de l'électronique. Si la fiabilité des composants n'est pas connue, alors on peut considérer les probabilités de pannes égales. La sélection des candidats dans un chaîne causale telle que $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E \rightarrow F$, où F est l'élément anormal observé et A, B, C, D, E des candidats, se fera de façon dichotomique. La théorie de l'information pourra donc être un autre facteur intervenant dans le choix des tests.

Le fait que certains paramètres soient critiques devrait aussi influencer le choix des tests. Par exemple, la présence de gaz explosifs dans un transformateur est critique. Si la présence de gaz explosifs fait partie de la liste de candidats d'une panne, elle devrait être considérée prioritairement.

Si un paramètre a un effet dont il est l'unique cause ($A \rightarrow B$ et il n'existe pas $C \neq A$ tel que $C \rightarrow B$), la valeur de son effet est une indication précieuse car elle permet de déduire celle de la cause à moins qu'il soit défectueux. Cela permet de confirmer ou d'infirmer les doutes sur un candidat en utilisant l'effet. L'utilité de cette propriété est d'exploiter l'effet si sa mesure est beaucoup plus facile que celle de la cause.

Les tests dans la pratique sont regroupés. Si deux tests requièrent des conditions semblables et que l'un doit être effectué, l'autre le sera aussi car son coût est rendu presque nul par le premier. Donc la requête d'un test peut amener une information supplémentaire à celle qui est recherchée ce qui le rendrait plus intéressant.

Ces différents facteurs sont à prendre en compte dans le choix définitif du test à réaliser pour élaguer l'ensemble des candidats. Selon les situations, la pondération de ces facteurs pourra changer. Une heuristique permettrait de la contrôler.

L'information supplémentaire fournie se traduit par la connaissance de nouvelles valeurs observées dans le réseau causal. L'algorithme de génération de candidats serait

réutilisé pour calculer le nouvel ensemble de candidats qui est forcément un sous-ensemble du précédent.

Le diagnostic se termine lorsque l'état de tous les composants est connu ou encore lorsqu'un candidat défectueux est repéré et que l'utilisateur juge l'explication satisfaisante.

La génération des candidats suivant l'approche de Van de Velde ne reposant pas sur l'hypothèse d'unicité de la faute, les fautes multiples seront considérées.

Il est possible que la relation de causalité $A \rightarrow B$ ne soit applicable que dans certaines circonstances. Par exemple, si A représente la gravitation et B le mouvement d'un objet, la gravitation peut être la cause d'un mouvement descendant mais pas d'un mouvement ascendant car il doit y avoir une force qui s'applique sur l'objet pour l'élever. Cette remarque implique que les réseaux causaux dont les nœuds sont simplement des paramètres peuvent générer des candidats inutiles dans certains cas. Pour les éviter, les nœuds du réseau causal pourraient être remplacés par des valeurs de paramètres, ce que Van de Velde appelle des propositions. Par exemple $A \rightarrow B$ pourrait être détaillé en $A \rightarrow B$ descendant. Cependant, la description du réseau causal tenant compte des valeurs des paramètres est plus lourde que celle qui utilise simplement les paramètres. Une alternative serait d'utiliser un modèle qualitatif du système pour vérifier la pertinence d'un candidat. Connaissant le candidat à vérifier, il pourrait être générer automatiquement ses valeurs possibles et effectuer la vérification sur chacune d'entre elles. Les contraintes sur les valeurs que peut prendre le paramètre devraient être fournies aux modèles qualitatifs pour élaguer autant que possible les possibilités. Malgré tout, l'utilisation des modèles qualitatifs est toujours bornée aux limitations que nous avons évoquées.

Milne [Chandrasekaran et Milne, 1985] a développé une théorie des responsabilités, qu'il appelle aussi raisonnement à partir des deuxièmes principes, où la façon dont l'anormalité se manifeste donne des indications sur les composants qui pourraient en être la cause. Si à la sortie d'un appareil on observe un courant intermittent, un ingénieur en déduirait que la panne est due à un faux contact et non à des paramètres qui varient de façon continue. Des associations similaires pourraient être introduites pour réduire davantage le nombre des candidats générés.

5.2.4 Acquisition des réseaux causaux

Pour que le raisonnement tenu à partir des réseaux causaux soit profond, il faut que les réseaux causaux reflètent les mécanismes physiques opérant dans le système. C'est pourquoi il semble souhaitable de dériver les réseaux causaux à partir des descriptions fonctionnelles. Les structures fonctionnelles sont des ensembles d'équations liant les paramètres d'un système et comme nous l'avons mentionné au début de ce chapitre, elles n'expriment pas la causalité entre les paramètres. Cependant, elles permettent d'établir des liens entre les paramètres et un expert rajouterait le sens de ces liens. La structure fonctionnelle garantirait ainsi que tous les rapports de causalité ont été couverts. En effet, tous les rapports entre éléments étant identifiés dans la structure fonctionnelle, seule la causalité est perdue. Le problème de l'acquisition d'un réseau causal se décompose donc en celui de l'acquisition de la structure fonctionnelle et celui de la dérivation des liens de causalité.

L'acquisition de la structure fonctionnelle est facilitée si l'on se sert de la structure physique comme le suggèrent De Kleer et Brown [De Kleer et Brown, 1984]. À chaque composant est associée sa structure fonctionnelle et l'assemblage des structures fonctionnelles des composants forme la structure fonctionnelle du système. Une description hiérarchique permet de faciliter les descriptions des structures physiques et fonctionnelles [Davis, 1984] [Genesereth, 1984]. L'assemblage des structures fonctionnelles consiste à faire correspondre les paramètres des différents composants. Une description qualitative est suffisante ici puisque de toute façon les valeurs des paramètres seront abstraites dans le réseau causal et seront restreintes à l'ensemble {normal, anormal}.

Nous ouvrons ici une parenthèse sur la provenance de la structure fonctionnelle car certaines idées maîtresses sur ce sujet nous semblent contestables. C'est le cas du principe "no-function-in-structure" énoncé par De Kleer et Brown [De Kleer et Brown, 1984] qui suppose que la structure fonctionnelle d'une partie ne dépend du reste du système auquel elle appartient. Or si nous décrivons la structure fonctionnelle de l'huile pour le transformateur ou pour un disjoncteur, les caractéristiques seront différentes. Pour le disjoncteur, l'huile aura pour fonction de lubrifier le mécanisme de déclenchement et pour le transformateur, elle a pour fonction de dissiper la chaleur et d'isoler. Toutes les caractéristiques pourraient être intégrées dans un élément générique, comme cela devrait se faire idéalement d'après Hayes [Hayes, 1985], mais à cause des limites des ordinateurs et

aussi pour faciliter l'exploitation des structures fonctionnelles, elles devraient exprimer strictement l'information utile pour l'application à traiter. De plus l'identification des paramètres dépend des tests existants. C'est le cas du rapport de tours dans le transformateur où il existe un test permettant d'acquérir sa valeur et c'est pourquoi ce paramètre est intégré à la structure fonctionnelle en plus des nombres de tours eux-mêmes.

L'autre idée que nous voulons débattre sur l'origine des structures fonctionnelles est qu'elles ne sont pas uniquement dérivées de la structure physique et des théories sur leur fonctionnement du système (principes de base en électromagnétisme, mécanique, etc.) mais aussi de l'expérience acquise sur le terrain. C'est parce qu'on sait dans la pratique que le bruit produit par un transformateur en fonction est un indice important qu'il faut l'intégrer dans sa modélisation. La connaissance acquise sur le terrain précède donc parfois la modélisation. Pour que la structure fonctionnelle puisse couvrir de façon satisfaisante les pannes rencontrées dans la pratique, il faut qu'elle soit aussi complète que possible, c'est-à-dire qu'elle doit intégrer les connaissances théoriques et celles du domaine. Sa description est donc aussi guidée par une heuristique. Le système expert ne pourra traiter que les pannes qui sont liées aux paramètres et aux relations fonctionnelles qu'il connaît. Si une panne résulte d'un phénomène qui est inconnu, comme c'est le cas de la panne générale d'Hydro-Québec du début de l'année 1989 qui était due aux influences magnétiques solaires, il faudra rajouter la nouvelle connaissance dans la structure fonctionnelle pour que le système expert puisse par la suite la traiter.

Une fois que la structure fonctionnelle est fournie, un expert doit transformer les équations entre paramètres en relations causales. Par exemple, la relation fondamentale de la mécanique classique $F = m * a$ appliquée à un joueur de curling qui lance sa pierre donnera lieu à $F \rightarrow a$ (la masse est supposée constante et n'entre donc pas dans des relations de causalité).

Les relations causales lient soit les paramètres soit les états de paramètres, comme le montre la figure 5.7 (p. 65), ce que Van de Velde appelle des propositions. Dans ce dernier cas, l'expert doit préciser quelles sont les valeurs des paramètres à considérer et fournir les relations causales qui les concernent.

Dans le réseau de causalité résultant, certains paramètres ne sont pas significatifs parce qu'ils ne représentent pas une information intéressante. Leur présence sert à exprimer les lois physiques opérant dans le système. Par exemple, un transfert de chaleur permet

d'exprimer que la température d'un élément sera influencée par celle de son voisin mais n'apporte pas d'information utile pour le diagnostic, contrairement aux températures elles-mêmes. Le réseau initial dérivé de la structure fonctionnelle est simplifié en éliminant les paramètres non-significatifs. C'est encore à l'expert de définir quels sont les paramètres significatifs et de leur associer le test permettant d'acquérir leur valeur.

Il se peut que des paramètres significatifs ne soient pas mesurables, auquel cas on ne peut que soupçonner leur dysfonctionnement à moins qu'ils aient un effet unique. La température dans certains endroits du transformateur est un paramètre significatif mais n'est pas accessible. Si un paramètre non mesurable a une grande importance, il pourra justifier la recherche de nouveaux moyens de mesures. Une équipe du MIT recherche d'ailleurs de nouvelles façons de surveiller des paramètres jusqu'ici non-mesurables dans le transformateur [Hagman et al., 1988].

Les règles de simplification résultent de la transitivité des relations causales et sont montrées à la figure 5.9. Nous considérerons deux types de relations causales, la première étant instantanée et la deuxième tenant compte du cumul de l'influence dans le temps tel que nous en avons discuté précédemment. D'autres types de relations causales pourraient être aussi traitées de façon similaire, mais nous nous limitons à ces deux là par souci de simplification et pour préparer l'exemple de la section suivante.

Ces règles conduisent donc à un réseau causal simplifié qui permettra de simplifier la phase de génération des candidats et de ne considérer que ceux qui sont significatifs. Un dernier point reste à être couvert, celui-ci d'identifier les paramètres exogènes, ce qui une fois de plus devra être fait par l'expert. Le réseau causal résultant sera utilisé dans le diagnostic.

5.2.5 Exemple d'utilisation des réseaux causaux au diagnostic d'appareil électrique

Nous avons choisi encore une fois le transformateur pour donner un exemple d'utilisation d'un réseau causal en diagnostic. Ce choix a été guidé par le fait que le transformateur est un appareil où les phénomènes physiques sont de natures diverses et qu'il est suffisamment complexe pour donner une idée réaliste de l'application des réseaux causaux, ce qui permet de généraliser plus directement l'approche aux autres appareils.

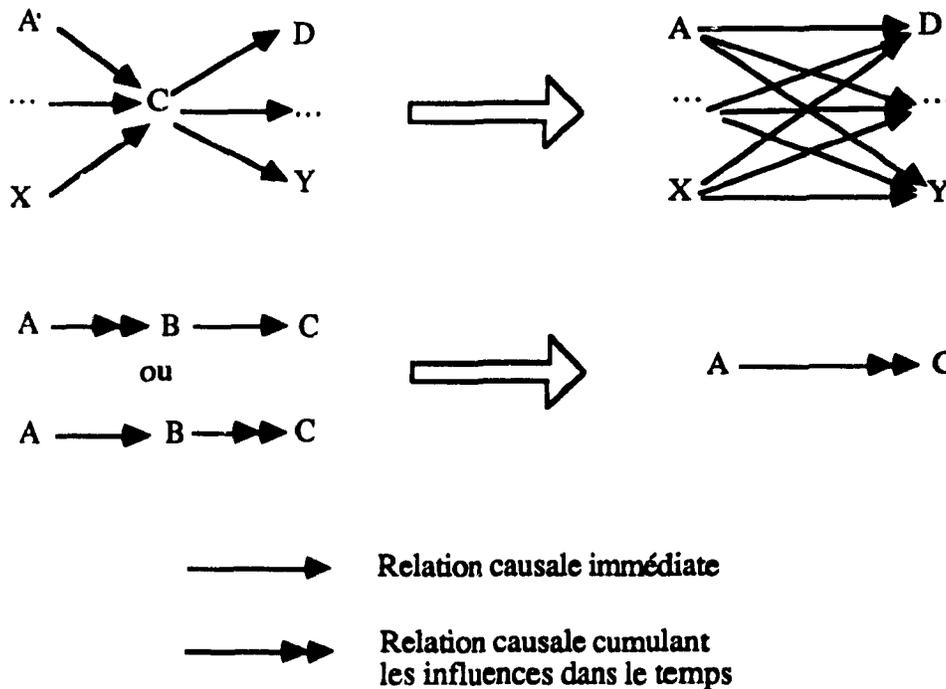


Figure 5.9 Règles de simplification de réseaux causaux

Nous allons procéder dans un premier temps à l'acquisition du réseau causal simplifié du transformateur à partir de la structure fonctionnelle. Les structures physiques et fonctionnelles du transformateur sont représentées à la figure 5.10. Ces structures sont dérivées des descriptions du transformateur dans des manuels scolaires [Glover et Sarma, 1987], d'ouvrages du domaine [Pansini, 1988], de connaissances en conception de transformateur [Lowdon, 1980] et de connaissances intuitives. Par exemple, l'équation $V_{out} = Z * I_{out}$ est issue des connaissances de base sur les transformateurs; le fait que la couleur de la cuve est proportionnelle aux influences thermiques cumulées dans le temps est une connaissance du domaine; l'équation $V = F * N$ découle de l'équation $V = 4 * f * f * N * F * 10^{-8}$ qu'on retrouve dans les livres de conception de transformateurs; et enfin le fait que le bruit dépend du serrage des plaques dans le noyau dérive d'une connaissance intuitive bien que la théorie sur les relations entre vibrations et bruit puisse aussi le justifier. La structure de la figure 5.10 est grossière et pourrait être rendue davantage précise en tenant compte par exemple de la connaissance sur les gaz dissous et des modèles électriques détaillés. Néanmoins, cette structure fonctionnelle reflète les principales lois électriques du transformateur et quelques autres phénomènes tels que thermiques ou chimiques. Un ingénieur expérimenté pourrait la compléter.



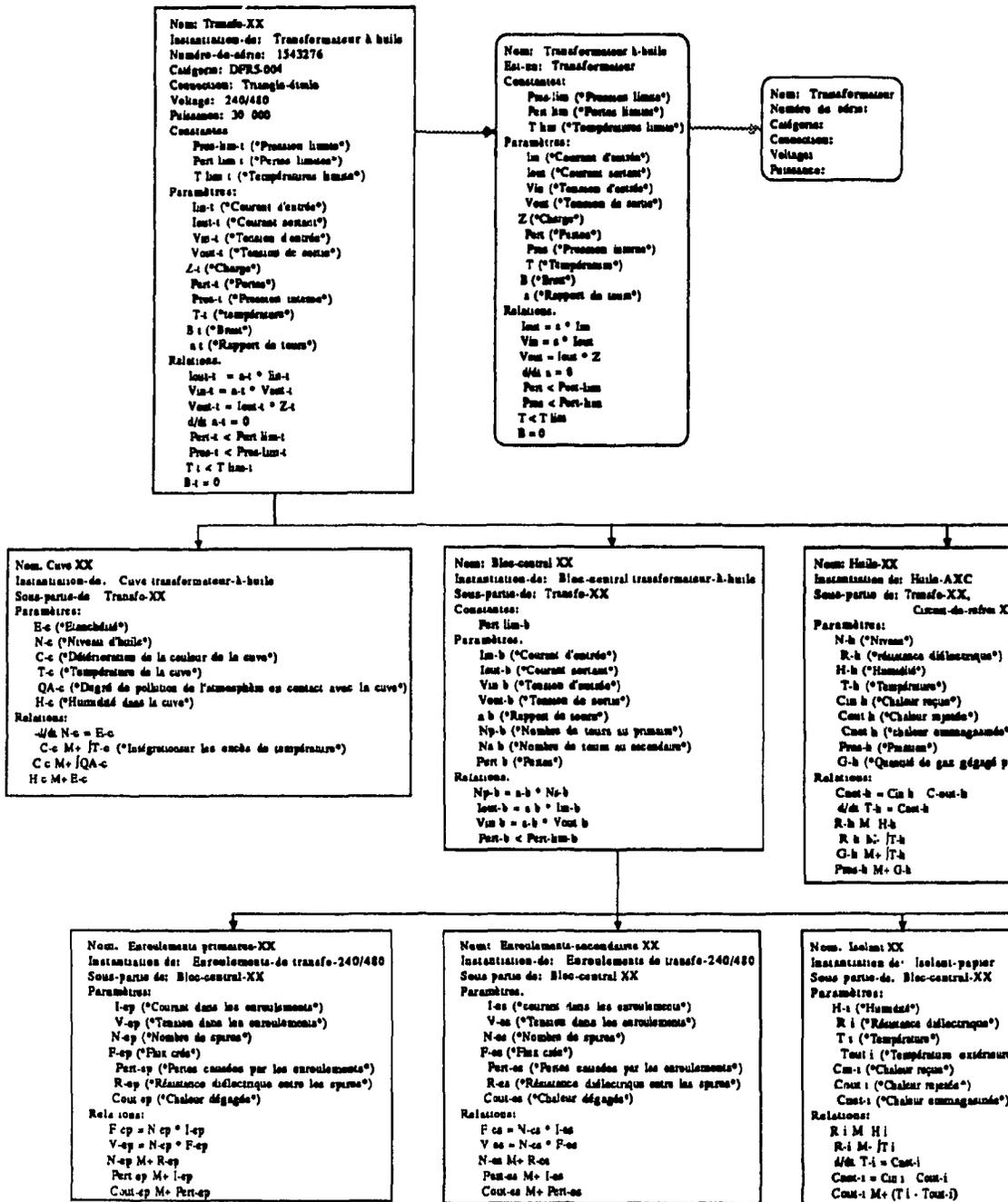
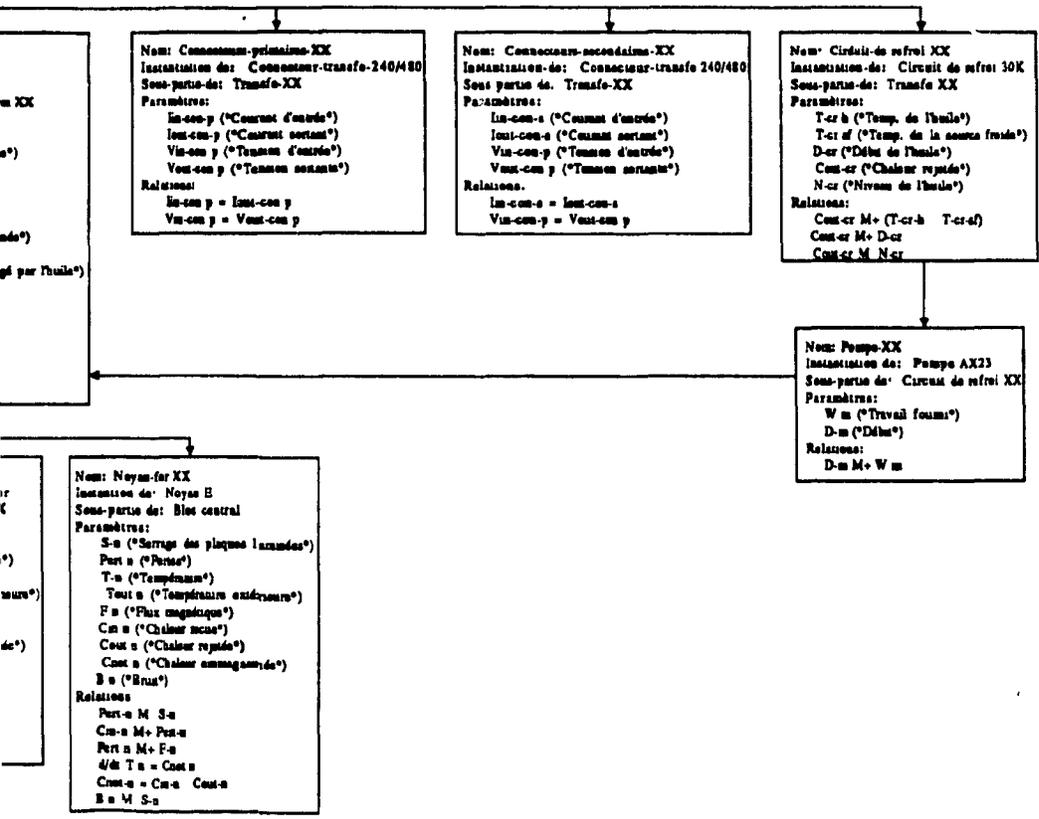


Figure 5.10 Réseau sémantique

Relations fonctionnelles exprimant la correspondance entre les paramètres des différents parties:

$I_{in-i} = I_{in-con}$	$I_{out-con-s} = I_{out-i}$	$T_h = T_{out-i}$
$I_{out-i} = I_{out-con}$	$I_{in-b} = I_{ep}$	$N_h = N-cr$
$V_{in-i} = V_{in-b}$	$I_{out-b} = I_{-oe}$	$H_a = H_i$
$V_{out-i} = V_{out-b}$	$V_{in-b} = V_{ep}$	$C_{in-b} = C_{out-i} + C_{out-s}$
$P_{out-i} = P_{out-b}$	$V_{out-b} = V_{-oe}$	$C_{out-b} = C_{out-cr}$
$P_{in-i} = P_{in-b}$	$P_{out-b} = P_{out-ep} + P_{out-oe} + P_{out-s}$	$D-cr = D-m$
$T_c = T_h$	$C_{in-b} = C_{out-i} + C_{out-s}$	$C_{in-i} = P_{out-ep} + C_{out-s}$
$a_i = a-b$	$T_c = T_h$	$R-ep = R_i$
$B-i = B-s$	$N-c = N-h$	$R-oe = R_i$
$I_{in-con-p} = I_{in-i}$	$H-c = H-b$	$F-ep = F-s$
$I_{out-con-p} = I_{in-b}$	$T_h = T-cr-h$	$F-a = F-ep$
$I_{in-con-s} = I_{out-b}$	$T-h = T_{out-s}$	



→ A pour sous partie
 → Est une instance de
 Est un
 [] Objet instancié
 [] Objet générique

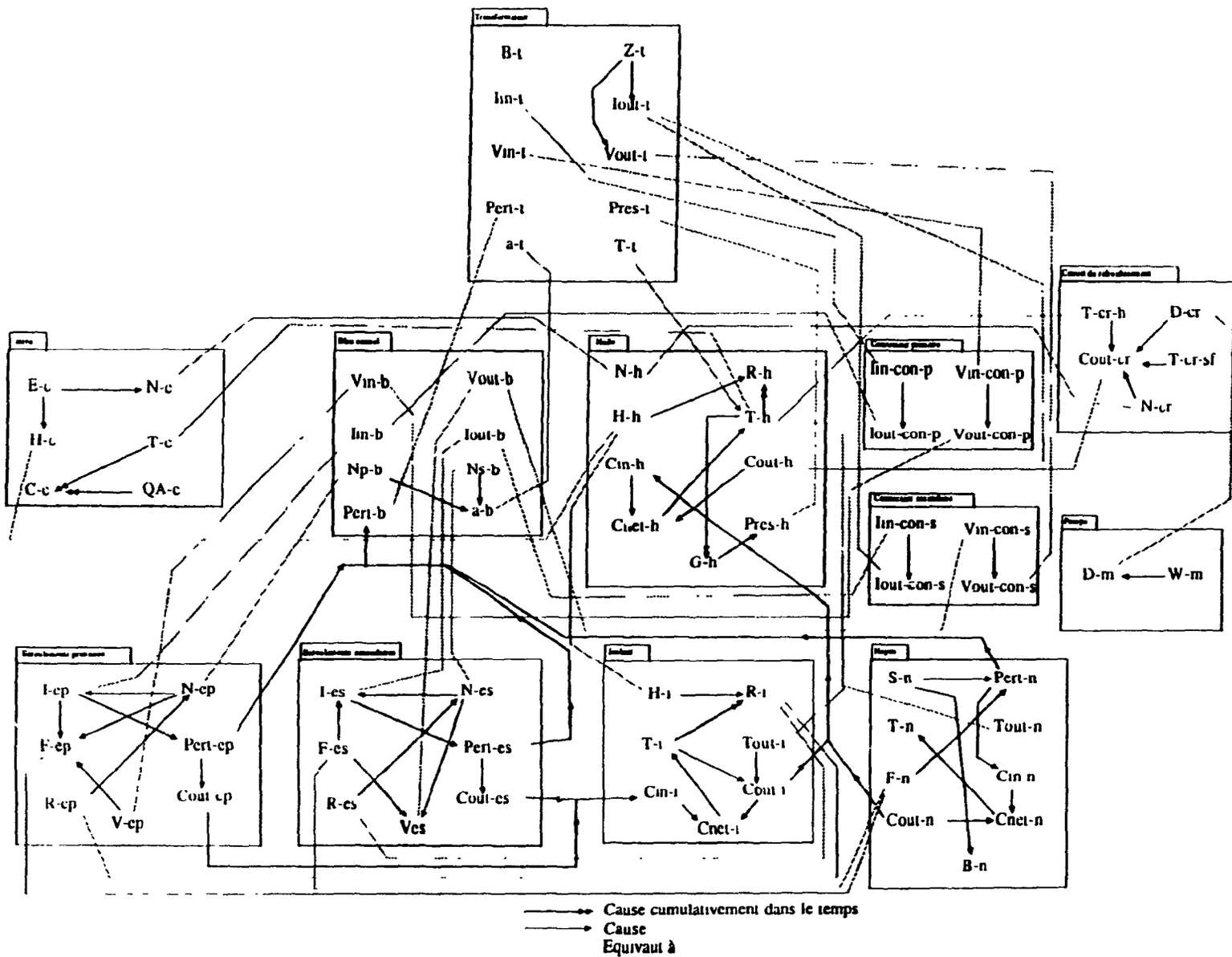
nantique du transformateur

Nous avons utilisé la notation de Kuipers pour représenter les équations qualitatives et nous avons ajouté l'opérateur \int pour tenir compte des influences cumulatives dans le temps. Certaines contraintes consistent à limiter la valeur d'un paramètre. Par exemple, la température de l'huile doit être inférieure à une certaine valeur. Nous avons déclaré les valeurs limites en constante (cf. le schéma du transformateur) et elle sont traitées comme des valeurs singulières par la structure fonctionnelle. Les liens entre les structures des différentes parties sont décrits dans l'ellipse. Il s'agit principalement d'équivalences entre paramètres et aussi de relations fonctionnelles liant les paramètres de différentes parties comme c'est le cas pour les pertes du transformateur qui sont la somme des pertes dans les enroulements et dans le noyau. Des équivalences ont été extrapolées pour simplifier la structure fonctionnelle et aussi parce qu'elle reflète tout de même une relation existante. Par exemple, nous avons écrit que le taux d'humidité dans l'huile était équivalent à celui de l'isolant ($H-h = H-i$) ce qui n'est pas exact mais par contre, la présence d'humidité dans l'huile entraîne sa présence dans l'isolant.

Les structures physique et fonctionnelle sont intégrées dans un réseau sémantique. Tout comme pour l'élément transformateur, chaque partie est en fait une instanciation de son élément générique qui lui-même appartient à une classe mais pour des raisons de place nous n'avons pas représentés tous les éléments génériques relatifs aux parties du transformateur. Les flèches désignant les sous-parties d'un élément permettent de hiérarchiser la description des structures.

À partir de la structure fonctionnelle nous avons dérivé le réseau causal complet qui est représenté dans les figures 5.11 et 5.12. Les nœuds du réseau causal sont des paramètres dont la valeur est abstraite. Par exemple, une température anormale de l'huile est forcément une température élevée. La figure 5.11 respecte le découpage des parties et dans la figure 5.12, tous les paramètres équivalents sont fusionnés pour simplifier le réseau causal. Les simplifications effectuées sont simplement le fusionnement des paramètres équivalents qui s'est fait en abandonnant le suffixe identifiant l'appartenance à une partie et le remplacement des courants et des tensions passant par les connecteurs par Iin-int, Iout-int, Vin-int et Vout-int. Dans cette transformation, nous rappelons que la connaissance sur le sens des influences est rajoutée. Par exemple, le courant dans les enroulements primaires causent un flux dans le noyau et le flux dans le noyau va causer un courant dans les enroulements secondaires.

Figure 5.11 Réseau causal complet suivant le découpage de la structure physique



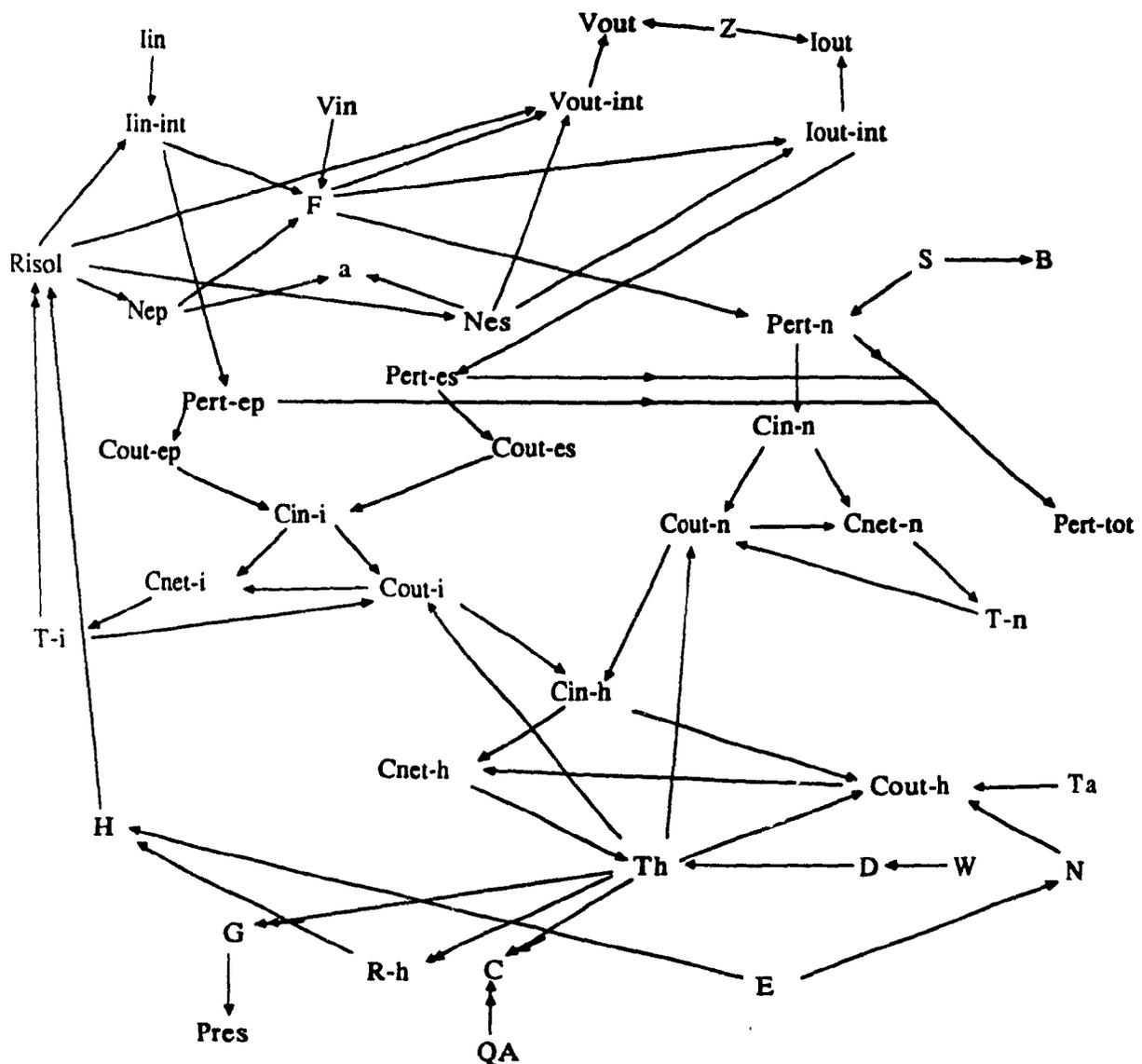
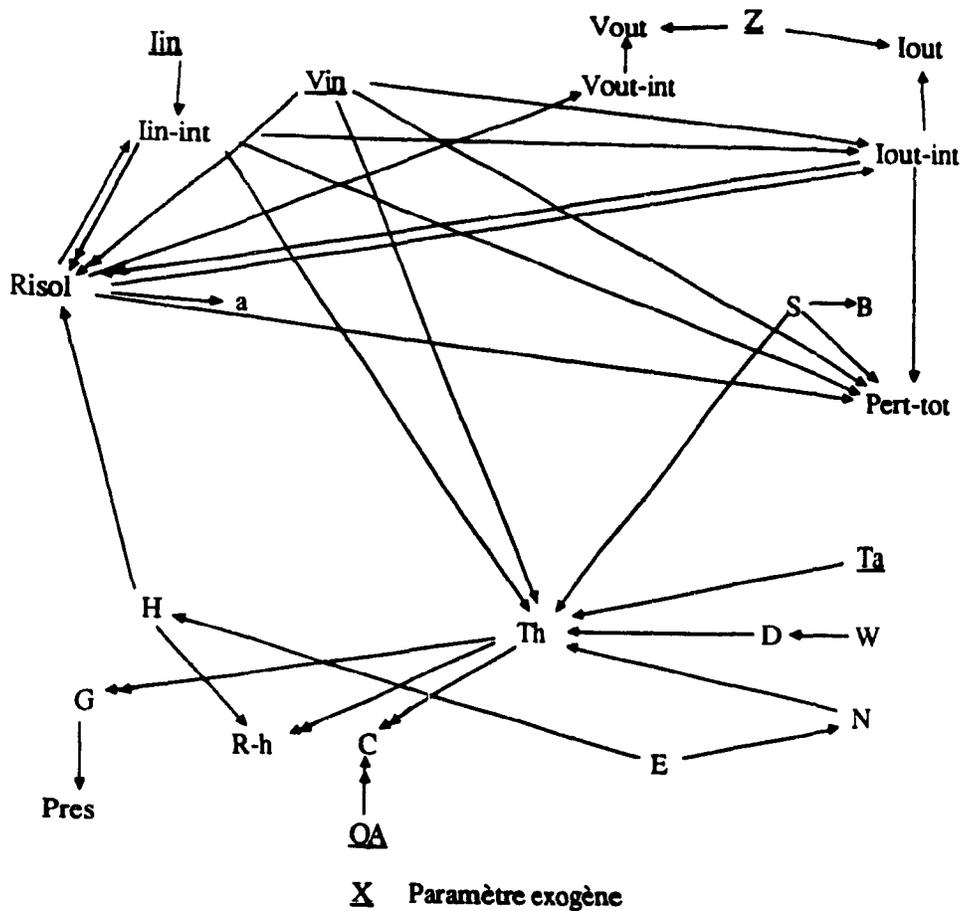


Figure 5.12 Réseau causal complet après fusionnement des paramètres

Ensuite les paramètres non significatifs sont éliminés et les paramètres exogènes identifiés (paramètres soulignés) ce qui donne lieu au réseau causal final illustré à la figure 5.13 qui indique aussi les paramètres éliminés. Nous remarquons la présence de certaines boucles telles que celle qui lie Risol à Iout-int. En effet, le courant interne peut provoquer progressivement la dégradation de l'isolant avec des surtensions et un isolant en mauvais état aura une influence directe sur le courant dans les enroulements.

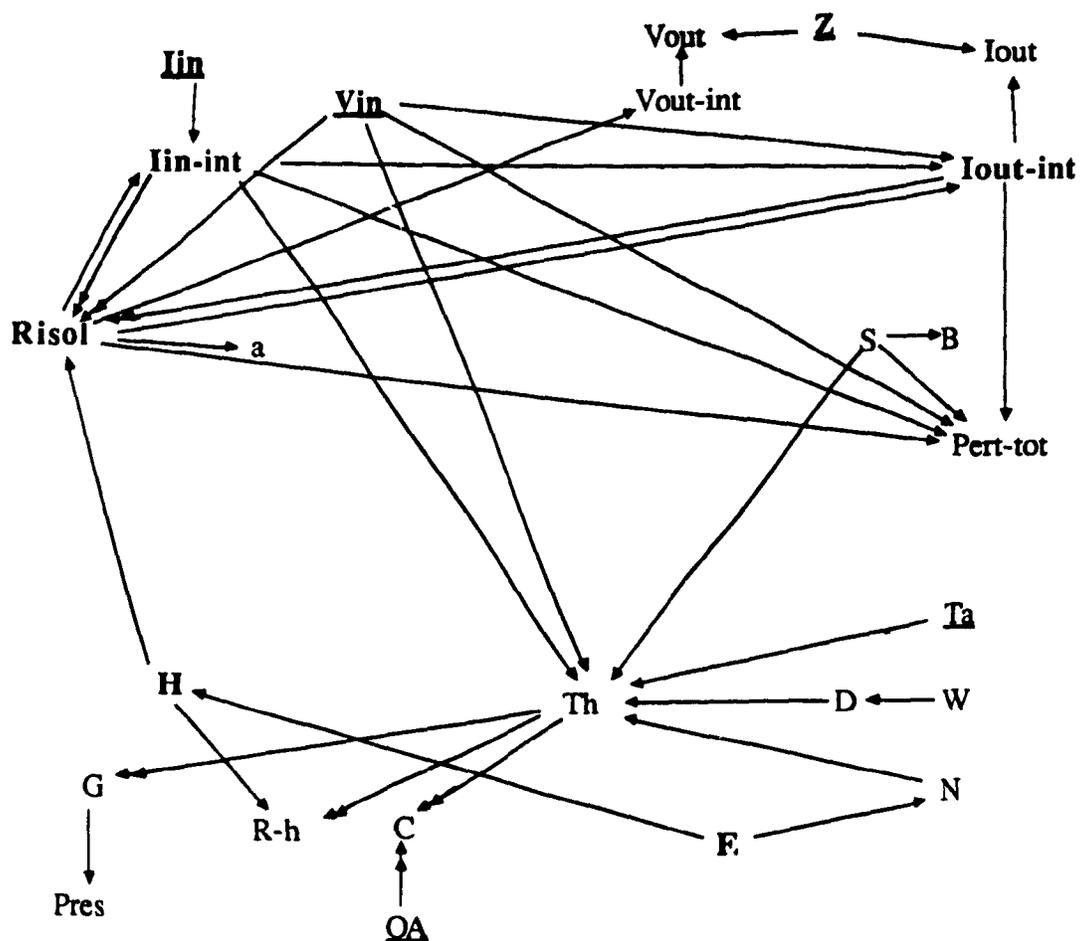


Paramètres éliminés:

F	Pert-ep	Cout-i	Cnet-h
Nep	Cout-ep	Cin-h	Cout-h
Nes	Cin-i	Cin-n	T-n
Pert-n	Cout-es	Cout-n	T-i
Pert-es	Cnet-i	Cnet-n	

Figure 5.13 Réseau causal simplifié

Maintenant que le réseau causal du transformateur est fourni nous pouvons l'utiliser pour diagnostiquer une panne hypothétique. Supposons que nous observions une panne par déclenchement différentiel. Le courant de sortie du transformateur était donc anormal. Ici comme l'observation se limite au courant de sortie anormal, il suffit de remonter la chaîne de causalité rattachée au courant de sortie pour générer les candidats comme le montre la figure 5.14.



X Paramètre candidat

Figure 5.14 Utilisation du réseau causal dans le cas d'un déclenchement différentiel

Tout d'abord, les paramètres exogènes sont examinés. Nous vérifions les valeurs du courant d'entrée, de la tension d'entrée et de la charge lorsque la panne s'est produite. Si ces valeurs sont normales alors les candidats I_{in-int} , $I_{out-int}$ (courants traversant les connecteurs), R_{isol} (résistance de l'isolant), H (présence d'humidité dans le transformateur), E (étanchéité de la cuve) seront considérés. On pourra alors soupçonner la résistance de l'isolant. Un test sur le rapport de tours donnera une première indication sur la responsabilité de l'isolant sur la panne. Si le test montre un rapport de tours anormal, un test plus poussé pourra être réalisé sur l'isolant. Si la résistance de l'isolant est effectivement très basse, alors on peut croire que les connecteurs sont dans un état normal dans un premier temps simplement parce qu'ils sont des influences indépendantes et que les pannes multiples sont moins probables que les pannes simples. Une fois que l'état anormal

de l'isolant a été identifié, il faut vérifier que ce défaut ne soit pas le résultat d'un autre en amont. On vérifiera l'huile; si elle est dénuée d'humidité alors la dégradation de l'isolant pourra être imputée à l'influence des courants et de la tension d'entrée dans le temps. Si l'historique de l'appareil montre que les conditions d'opération ont été normales, alors on concluera à un défaut de l'isolant.

Le raisonnement de diagnostic aurait procédé de la même façon avec une alarme de température, de pression de gaz, la détection de pertes trop grandes.

Malgré le fait que cette méthode de diagnostic ait été illustrée, aucune expérimentation réelle n'a été menée. L'algorithme de génération de candidats existe déjà [Van de Velde, 1985] et des outils pour l'exploitation de la théorie d'information [De Kleer et Williams, 1987] [Automated Reasoning, 1988] et pour la simulation à l'aide de modèles qualitatifs [Kuipers, 1986] ont fait l'objet d'études et d'expérimentations. La difficulté dans la réalisation de cette approche est de recueillir des modèles qualitatifs et des réseaux causaux adéquats ainsi que l'heuristique intervenant dans les facteurs de choix de tests et de pondération de ces facteurs. L'intégration de toute la connaissance relative à la phase de sélection de candidats peut s'avérer être complexe. Ceci nécessiterait de réaliser une application réelle avec le support d'un expert du domaine. Un tel exercice serait d'un intérêt considérable pour cette thèse mais dépasse son cadre. Néanmoins, il est souhaitable qu'il puisse être réalisé dans le futur.

5.2.6 Comparaison des réseaux causaux et des modèles qualitatifs

Les réseaux causaux ne forment pas une approche indépendante par rapport aux modèles qualitatifs. D'une part, les modèles qualitatifs sont le point d'origine de l'acquisition des réseaux causaux et d'autre part, ils pourraient servir à discriminer des candidats. Il serait plus exact de voir l'approche des réseaux causaux comme une extension de celle reposant sur les modèles qualitatifs car elle exploite une information complémentaire.

Dans la démarche du diagnostic exposée dans la section 5.1, les modèles qualitatifs n'intervenaient qu'au niveau de la vérification d'hypothèses et posaient les limitations d'ambiguïté des résultats, de la provenance des hypothèses, de sélection des candidats et de

complexité. Une différence notable entre les modèles qualitatifs et les réseaux causaux est que les premiers traitent des hypothèses sur la panne et les seconds des candidats. Les hypothèses portent sur la valeur d'un paramètre ou un changement dans les équations qualitatives alors que les candidats sont associés simplement à un paramètre ou à une valeur de paramètre. Les candidats font donc abstraction du détail du dysfonctionnement pour simplement identifier l'élément fautif du système. Ils représentent une information suffisante pour le diagnostic.

Contrairement aux modèles qualitatifs, les réseaux causaux ne sont pas utilisés pour déduire la validation d'une hypothèse sur l'origine d'une panne mais pour déduire les candidats possibles. Ils les génèrent automatiquement et réalisent donc une étape essentielle du diagnostic que les modèles qualitatifs ne pouvaient satisfaire. À la limite, des candidats inutiles sont générés mais cela n'empêche pas la réalisation de cette démarche.

Étant donné que les réseaux causaux servent à générer un ensemble de candidats mais ne s'attachent pas à les valider, le problème d'ambiguïtés des résultats ne se pose pas.

Quant à la sélection des candidats, les réseaux causaux y jouent un rôle à travers l'exploitation de la théorie de l'information qui utilise les chaînes de causalité. Mais c'est l'intégration d'un ensemble de facteurs qui permet réellement de la réaliser. La sélection des candidats est donc une étape du diagnostic qui n'est pas non plus accomplie par les réseaux causaux.

Finalement, étant donné la simplicité des réseaux causaux, leur utilisation ne se heurte pas à des problèmes de complexité et est donc adaptée pour traiter des systèmes complexes.

L'approche par les réseaux causaux nécessite leur acquisition, l'acquisition de la connaissance du domaine relative à la sélection des candidats et l'organisation de l'exploitation de cette dernière connaissance. Un expert ayant une connaissance profonde et pratique de l'appareil doit fournir la structure fonctionnelle initiale et effectuer les étapes de dérivation du réseau causal. Cela est plus contraignant que de recueillir seulement les modèles qualitatifs.

5.2.7 Généralisation de l'application des réseaux causaux

Les réseaux causaux permettent de traiter les phénomènes continus et discontinus puisque la causalité n'est pas contrainte par la nature des phénomènes. Quant aux systèmes à plusieurs états, les relations de causalité pourraient couvrir les passages d'un état à l'autre et de même que pour les modèles qualitatifs, des réseaux causaux propres à chaque état devraient être fournis. Ceci implique que l'approche des réseaux causaux est très générale et qu'elle pourrait s'appliquer de la même façon aux autres appareils électriques qu'au transformateur.

Les réseaux causaux sont donc une approche simple au problème du diagnostic d'appareils électriques. Leur efficacité dépendra du nombre de candidats générés pour une panne donnée ainsi que de la sélection de ces candidats.

6. CONCLUSION

6.1 Récapitulation

Nous nous sommes intéressés dans cette thèse à étudier les outils informatiques d'aide au diagnostic d'appareils électriques. Avant de traiter le diagnostic pour l'appareillage électrique, nous avons présenté dans le deuxième chapitre le problème du diagnostic dans le contexte de l'industrie en général. Nous en avons tout d'abord présenté les différentes significations qu'on retrouve dans la littérature et dans la pratique et précisé celle que nous avons gardée dans le cadre de cette thèse. Nous avons considéré que le diagnostic intervenait lorsqu'une panne était détectée alors que dans d'autres contextes, il est synonyme simplement d'analyse du système sans forcément qu'il y ait présence de panne. Il a été rappelé que le diagnostic n'est qu'une phase des programmes d'entretien qui couvrent l'opération des systèmes sur toute leur vie. Puis nous avons évoqué les problèmes de l'industrie qui sont la centralisation, la conservation, la transmission et la disponibilité de l'expertise au sein de la compagnie et qui ont motivé la recherche de moyens informatiques pour y apporter une solution.

Le troisième chapitre a fait l'étude des méthodes conventionnelles d'aide au diagnostic. Nous avons présenté les méthodes basées sur des arbres de défaillances, des FMEA et sur l'analyse de données. Mais étant donné qu'elles sont longues à développer, qu'elles nécessitent un historique complet, que les mises à jour sont lourdes, qu'elles donnent lieu à des raisonnements rigides de nature différente de ceux de l'homme et qu'elles n'autorisent pas une grande souplesse d'utilisation, nous nous sommes tournés vers une technologie plus récente et prometteuse, celle des systèmes experts.

Étant donné que la thèse allait s'intéresser par la suite à cette technologie, nous l'avons présentée au quatrième chapitre. Nous avons tout d'abord justifié l'intérêt que nous y portons en exprimant les avantages des systèmes experts par rapport aux méthodes conventionnelles, c'est-à-dire qu'ils permettent de reproduire le dynamisme du raisonnement, de représenter efficacement les connaissances en encodant leur sémantique, de laisser l'utilisateur maître du raisonnement et de faciliter les mises à jour. L'architecture et le fonctionnement des systèmes experts ont été expliqués dans les grandes lignes et nous avons souligné leurs caractéristiques en les comparant aux programmes algorithmiques. Il

existe différents types de systèmes experts: ceux qui sont basés sur une connaissance de surface, ceux qui reposent sur une connaissance profonde et ceux qui sont mixtes c'est-à-dire qui utilisent les deux approches précédentes à la fois.

Les systèmes experts basés sur une connaissance de surface sont bien connus et des applications réelles ont obtenu des résultats positifs dans de nombreux domaines y compris celui du domaine de l'appareillage électrique. Leur limitation est de ne pouvoir traiter que les cas qui ont déjà été décrits dans la base de connaissance et de ne pas être adaptés à des systèmes pour lesquels les manifestations de pannes sont en nombre presque infini. Nous avons par conséquent axé notre étude sur les systèmes experts basés sur la connaissance profonde qui auraient aussi des répercussions sur les systèmes mixtes. Dans la première section du cinquième chapitre, nous nous sommes concentrés sur la démarche qui a suscité le plus d'intérêt jusqu'à présent dans la littérature et qui est basée sur les modèles qualitatifs. Étant donné que les lois physiques opérant dans les systèmes sont souvent très complexes ou inconnues, la structure fonctionnelle des appareils électriques est décrite qualitativement. Nous avons donc présenté les principes du raisonnement qualitatif et exposé la méthodologie du diagnostic qui en découle. Nous avons complété cette étude en reprenant les principaux travaux en physique qualitative, ceux de De Kleer et Brown, Forbus et Kuipers, et nous les avons appliqués au diagnostic d'appareils électriques. Ceci nous a permis d'identifier les limitations de l'application des modèles qualitatifs au diagnostic de l'appareillage électrique, c'est-à-dire les ambiguïtés des résultats qui les rendent inutilisables dans l'étape de validation des hypothèses, le problème de génération d'hypothèses sur la panne, de sélection de celles qui sont valides, et la complexité de la simulation pour des gros systèmes.

Du fait de ces dernières remarques, nous nous sommes intéressés dans la deuxième section du cinquième chapitre à une autre approche pour les systèmes experts de diagnostic d'appareils électriques basés sur l'approche profonde. Les modèles qualitatifs n'exploitent pas les relations de causalité dans un système alors que le raisonnement de l'homme les utilisent. Ceci nous a amenés à considérer les réseaux causaux. Nous en avons présenté le concept puis exposé la méthodologie du diagnostic basé sur leur utilisation. Le fait que l'approche utilisant les réseaux causaux soit profonde repose sur leur propriété de refléter le fonctionnement du système. Nous avons donc proposé une méthode pour les acquérir qui consiste à les dériver à partir de la structure fonctionnelle en faisant appel à l'expert pour obtenir la connaissance sur les relations de causalité. Nous avons donné un exemple d'acquisition des réseaux causaux et de leur utilisation au diagnostic du transformateur.

Nous les avons ensuite comparés aux modèles qualitatifs et nous avons vu qu'ils permettaient de pallier les problèmes d'ambiguïtés des résultats, de génération des causes possibles d'une panne et de complexité. Ils interviennent dans l'étape de sélection des candidats à travers la théorie de l'information, mais le choix des tests pour discriminer les candidats repose sur l'intégration d'une multitude de facteurs tels que l'état critique des candidats, la facilité des tests, le regroupement des tests, l'utilisation des modèles qualitatifs et l'utilisation de l'effet d'un candidat. Les réseaux causaux tout comme les modèles qualitatifs ne traitent donc pas la phase de sélection des candidats. L'approche par les réseaux causaux nécessite de la part de l'expert le modèle qualitatif initial, l'information sur les liens de causalité ainsi que la connaissance relative aux divers facteurs de décision dans la sélection des candidats. Elle s'avère intéressante dans le cas de gros systèmes même si une expérimentation réelle n'a pas été réalisée car elle aurait exigé des ressources et un travail qui dépassent le cadre de la thèse.

6.2 Contributions de la thèse

Il a tout d'abord été fait une synthèse des méthodes de diagnostic industriel, ce qui englobe aussi le diagnostic pour l'appareillage électrique. Nous avons énuméré et décrit les méthodes conventionnelles et l'approche par les systèmes experts dont nous avons expliqué les avantages.

Mais la contribution importante de cette thèse est d'avoir étudié comment le diagnostic d'appareils électriques pouvait être traité par l'approche profonde. Nous avons tout d'abord couvert l'approche par les modèles qualitatifs qui suscitent beaucoup d'intérêt dans le monde de la recherche en intelligence artificielle. Nous avons repris les principaux travaux dans ce domaine et nous les avons appliqués à des exemples simplifiés d'appareils électriques, ce qui nous a permis d'en évaluer les avantages et les inconvénients. Malgré le fait que dans la littérature il soit beaucoup question de leur utilisation en diagnostic, nous avons mis en évidence de sérieuses limitations.

Les modèles qualitatifs ne sont pas le seul moyen de traiter le diagnostic de systèmes physiques complexes par l'approche profonde; nous avons aussi considéré les réseaux causaux. Van de Velde les avait déjà étudiés mais nous avons intégré ses résultats dans la méthodologie globale du diagnostic qui comprend non seulement la génération des

candidats mais toute la démarche qui part de l'observation de la panne jusqu'à la solution. Cela a principalement consisté à définir la méthodologie d'ensemble du diagnostic et à discuter du problème de sélection des candidats. Cette approche est intéressante car elle permet de pallier plusieurs inconvénients que posent les modèles qualitatifs.

Finalement, plusieurs idées secondaires mais nouvelles ont été proposées. Entre autres, nous avons contesté le principe de "no-function-in-structure" de De Kleer et Brown et soupçonné que les modèles qualitatifs n'exprimaient ni explicitement ni implicitement les relations de causalité d'un système, ce qui nous a amenés à considérer les réseaux causaux, et nous avons prétendu que l'approche profonde devait reposer sur une connaissance du domaine pour identifier les lois physiques opérant dans le système. Ces points constituent des éléments originaux dans la littérature sur l'approche profonde.

Ce travail a été orienté pour traiter les appareils électriques. Ceux-ci sont des systèmes physiques complexes qui reposent sur des lois physiques de natures diverses. La présente étude pourrait s'appliquer aussi à beaucoup d'autres systèmes, tels que mécaniques, thermiques, etc., pour lesquels les commentaires et les idées présentés restent valables. Il faut peut-être exclure de cette dernière liste les appareils à diagnostiquer en temps réel qui nécessiteraient d'attribuer une grande importance au temps, comme c'est le cas du diagnostic de panne de réacteurs d'avions en fonctionnement [Abbott, 1988]. Le cadre de cette thèse déborde donc de celui de l'appareillage électrique et se situe indirectement à un niveau plus général.

6.3 Orientations futures

Malgré l'étude de la deuxième section du cinquième chapitre, l'application potentielle des réseaux causaux à l'industrie électrique reste à être validée par le développement d'un système expert réel pour un équipement intégrant les différents aspects des appareils électriques, tel que le transformateur. L'utilisation pratique d'un concept est toujours son ultime test de validité. Cela nécessiterait qu'une industrie accorde les ressources financières et humaines appropriées. Entre autres, il faut que l'expert qui serait attaché à cette expérience ait une connaissance profonde de l'appareil et l'expertise concernant son opération. Pour l'instant, ce travail est à l'état d'étude et aucune suite pratique n'est envisagée dans l'immédiat.

Dans la méthode basée sur les réseaux causaux, nous avons identifié les connaissances qui devront intervenir dans la sélection des candidats, mais nous n'avons pas discuté de leur intégration de façon approfondie. Ce point pourrait soulever des problèmes intéressants en intelligence artificielle. L'intégration de connaissances diversifiées et indépendantes pourrait donner lieu à une architecture blackboard [Engelmore et Morgan, 1988]. Dans une première application, cette phase de sélection de candidats pourrait être simplifiée c'est-à-dire que l'état critique des candidats et le coût des tests par exemple pourraient être pris en compte, et l'utilisation des modèles qualitatifs et de la théorie de l'information écartée.

L'acquisition des connaissances est une étape majeure dans le développement des systèmes experts. Certaines recherches ont été menées pour automatiser l'acquisition de la connaissance heuristique pour des systèmes experts de diagnostic et ont abouti à des outils tels que MORE [Khan, 1988], MOLE [Eshelman, 1988], YAKA [McDermott, 1988]. Il serait intéressant d'entreprendre des recherches similaires pour l'acquisition des modèles qualitatifs, des réseaux causaux et de la connaissance relative à la sélection des candidats pour développer une méthodologie d'acquisition de ces connaissances. À partir de cette méthodologie, des outils d'acquisition automatique pourraient être développés.

Nous n'avons examiné dans cet ouvrage que les outils informatiques d'aide au diagnostic existants. Cependant d'autres outils informatiques qui n'ont pas encore été appliqués au diagnostic pourraient être considérés. Le raisonnement par analogie [Hall, 1989] semble une direction prometteuse étant donné que l'homme utilise beaucoup ce type de raisonnement. Les réseaux connexionnistes [Lippmann, 1987] permettraient d'associer directement un vecteur d'observations à des conclusions.

La suite théorique la plus intéressante à cette thèse serait de raffiner le concept des réseaux causaux. Nous avons déjà évoqué le fait que les relations de causalité ne pouvaient être valables que dans certaines conditions et considéré des relations de causalité temporelle. D'autre part, nous n'avons pas considéré le regroupement de paramètres pour qu'ils ne forment qu'une seule cause, comme c'est le cas dans les arbres de défaillances lorsque plusieurs branches sont liées par l'opérateur ET. Formaliser de tels réseaux causaux et les rendre adaptés aux phénomènes rencontrés dans l'appareillage électrique pourraient constituer la prochaine extension de ce qu'ils sont actuellement. L'algorithme de

Van de Velde et les règles de simplification du réseau causal initial devront être alors adaptés.

Cette thèse a donc réalisé une étude sur les outils informatiques d'aide au diagnostic d'appareils électriques. Elle est la première étape d'un cheminement vers une solution réelle. La suivante consisterait à réaliser un système expert basé sur les réseaux causaux en pratique et à raffiner le concept des réseaux causaux ainsi que leur application au diagnostic.

BIBLIOGRAPHIE

1. Références figurant dans la thèse

Abbott, K. (1988) "Robust Operative Diagnosis as Problem Solving in a Hypothesis Space", **Seventh National Conference on Artificial Intelligence (AAAI-88)**, 21-26 août, Saint-Paul, Minnesota, p. 369-374.

Automated Reasoning Corporation (1988), I-CAT, 1800 Northern Bd, Suite 102, Roslyn, NY 11576.

Bonissone P. P.; Johnson H. E. (1983) "Expert System for Diesel Locomotive Repair", **Knowledge-based Systems Reports**, General Electric Co., Schenectady, N.Y.

Bonnet A.; Haton J-P.; Truong-Ngoc J-M. (1986) "Systèmes experts: vers la maîtrise technique", InterEditions, Paris.

Boose, J.; Bradshaw, J. (1987) "Expertise Transfer and Complex Problems: Using AQUINAS as a Knowledge-Acquisition Workbench for Knowledge-Based Systems", **International Journal of Man-Machine Studies**, vol. 26, no. 2, février, p. 3-28.

Brachman, R. J. (1979) "On the Epistemological Status of Semantic Networks", **Associative Networks: Representation and Use of Knowledge by Computers**, Edited by N.V. Findler New-York, Academic Press, p. 3-50.

Cantone, R. R. (1985) "IN-ATE: A General Expert System Architecture for High-Level Fault Diagnosis", **Computer Expert Systems**, Bloc L. and Coombs M.J. (éditeurs), Springer-Verlag.

Chandrasekaran B.; Milne, R. (1985) "Reasoning about Structure, Behavior and Function", **SIGART Newsletter**, no. 93, juillet, p. 4-59.

Chatain, J.; Duchaussoy, A. (1987) **Systèmes experts: méthodes et outils**, Eyrolles, Paris.

Dague, P.; Devès, P.; Raiman, O. (1986) "Raisonnement qualitatif dans le diagnostic des pannes", **Sixièmes journées internationales : les systèmes experts et leurs applications (Avignon-86)**, 28-30 avril, Avignon, France, p. 613-632.

Davis, R. (1984) "Diagnostic Reasoning Based on Structure and Behavior", **Artificial Intelligence**, vol. 24, p. 347-410.

De Kleer, J.; Brown, J.S. (1984) "A Qualitative Physics Based on Confluences", **Artificial Intelligence**, vol. 24, p. 7-83.

De Kleer, J.; Brown, J.S. (1986) "Theories of Causal Ordering", **Artificial Intelligence**, vol. 29, p. 33-61.

- De Kleer J.; Williams, B.C. (1987) "Diagnosing Multiple Faults", **Artificial Intelligence**, vol. 32, p. 97-130.
- De Mori, R., Prager, R. (1989) "Perturbation Analysis with Qualitative Models", **Eleventh International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-89)**, (à paraître).
- Englemore, R.S.; Morgan A.J. (1988) **Blackboard Systems**, Englemore R. and Morgan T. (éditeurs), Addison-Wesley.
- Eshelman, L. (1988) "MOLE: A Knowledge-Acquisition Tool for Cover-and-Differentiating Systems", **Automatic Knowledge Acquisition for Expert Systems**, Marcus S. (éditeur), Kluwer Academic, p. 37-79.
- Farquhar, A.; Kuipers, B. (1987) **QSIM: A Tool for Qualitative Simulation**, (Disponible à l'université du Texas auprès de Dr. Kuipers), avril.
- Farreny, H. (1985) **Les systèmes experts: principes et exemples**, Techniques Avancées de l'Informatique, Cepadues éditions, Toulouse.
- Fink P. K.; Lusth, J. C. (1987) "Expert Systems and Diagnostic Expertise in the Mechanical and Electrical Domains", **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics**, vol. SMC-17, mai/juin, p. 340-349.
- Forbus, K. D., (1984) "Qualitative Process Theory", **Artificial Intelligence**, vol. 24, p. 85-168.
- Genesereth, M. (1984) "The Use of Design Descriptions in Automated Diagnosis", **Artificial Intelligence**, vol. 24, p. 411-436.
- Glover, J.D.; Sarma, M.S. (1987) **Power System Analysis and Design**, PWS.
- Gondran, M. (1986) "Diagnostic et Maintenance assistés par systèmes experts", cours de l'école d'été, **EDF** (France).
- Hagman W. H.; Crowley, T. H.; Tabors R. D.; Schweppe F. C. (1989) "An Adaptive transformer Monitoring System", **Symposium international pour la démonstration d'applications de systèmes experts dans l'industrie électrique**, Montréal, 7-12 mai, p. 23-36.
- Hall, R. P. (1989) "Computational Approaches to Analogical Reasoning: A Comparative Analysis", **Artificial Intelligence**, vol. 39, no 1, May, p. 39-120.
- Hayes, P.J. (1985) "The Second Naive Physics Manifesto", **Readings in Knowledge Representation**, Brachman R.J. and Levesque H.J. (éditeurs), Morgan Kaufman, p. 467-485.
- Henley E.J.; Kumamoto H. (1981) **Reliability Engineering and Risk Assessment**, Prentice Hall.
- Hudlická, E.; Lesser, V. (1987) "Modeling and Diagnosing Problem-Solving System Behavior", **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics**, vol. SMC-17, no. 3, mai/juin, p. 407-419.

- Iwasaki, Y.; Simon, H.A. (1986a) "Causality in Device Behavior", **Artificial Intelligence**, vol. 29, p. 3-32.
- Iwasaki, Y.; Simon, H.A. (1986b) "Theories of Causal Ordering: Reply to de Kleer and Brown", **Artificial Intelligence**, vol. 29, p. 63-72.
- Kahn, G. (1988) "MORE: From Observing Knowledge Engineers to Automating Knowledge Acquisition", **Automatic Knowledge Acquisition for Expert Systems**, Marcus S. (éditeur), Kluwer Academic, p. 7-35.
- Kuipers, K. (1984) "Commonsense Reasoning about Causality: Deriving Behavior from Structure", **Artificial Intelligence**, vol. 24, p. 169-204.
- Kuipers, B. (1987a) "Qualitative Simulation as Causal Explanation", **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics**, vol. SMC-17, mai/juin, p. 432-444.
- Kuipers, B. (1987b) **Creating and Debugging QSIM Models**, (Disponible à l'université du Texas auprès de Dr. Kuipers), octobre.
- Laird, J.E.; Rosenbloom, P.S., Newell, A. (1986) "Chunking in SOAR: The Anatomy of a General Learning Mechanism", **Machine Learning**, vol. 1, p.11-46.
- Lippmann R. P. (1987) "An Introduction to Computing with Neural Nets", **IEEE ASSP Magazine**, avril, p. 4-22.
- Lowdon, E. (1980) **Practical Transformer Design Handbook**, H.W.Sama and Co., Indianapolis, Indiana.
- Marcus, S. (1988) "SALT: A Knowledge Acquisition Tool for Propose-and-Revise Systems", **Automatic Knowledge Acquisition for Expert Systems**, Marcus S. (éditeur), Kluwer Academic, p. 81-123.
- Marin, M.; Jasmin, J.-L. (1989a) "SEDA-TRANSFO - Diagnostic de transformateur de puissance (déclenchement automatique)", **Symposium international pour la démonstration des applications des systèmes experts dans l'industrie électrique (SIDSE)**, 7-11 mai, Montréal, p. 19-21.
- Marrakchi, M.; Houriez, B.; Grzesiak, F.; Willaëys, D. (1985) "Un système expert d'aide au diagnostic", **Cinquièmes journées internationales : les systèmes experts et leurs applications (Avignon-85)**, 13-15 mai, Avignon, France, p. 505-533.
- McDermott, J. (1988) "Toward a Taxonomy of Problem-Solving Methods", **Automatic Knowledge Acquisition for Expert Systems**, Marcus S. (éditeur), Kluwer Academic Publishers, p. 225-256.
- Murthy, S. (1988) "Qualitative Reasoning at Multiple Resolutions", **Seventh National Conference on Artificial Intelligence (AAAI-88)**, 21-26 août, Saint-Paul, Minnesota, p. 296-300.
- Pansini, A. J. (1988) **Electrical Transformaers and Electrical Equipment**, Prentice Hall.

- Parsaye, K.; Chignell, M. (1988) **Expert Systems for Experts**, Wiley & Sons.
- Pau, L. (1975) "Diagnostic des pannes dans les systèmes. Approche par la reconnaissance des formes", **Cepadues éditions**, Paris.
- Pazzani, M. (1987) "Failure-Driven Learning of Fault Diagnosis Heuristics", **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics**, vol. SMC-17, n. 3, mai/juin, p. 380-394.
- Pearce, D.A. (1988) "The Induction of Fault Diagnosis Systems from Qualitative Models", **Seventh National Conference on Artificial Intelligence (AAAI-88)**, 21-26 août, Saint-Paul, Minnesota, p. 353-357.
- Raiman, O. (1986) "Order of Magnitude Reasoning", **Fifth National Conference on Artificial Intelligence (AAAI-86)**, Philadelphie, octobre.
- Riese, C. (1985) "RuleMaster - Transformer Fault Detection and Diagnosis Using RuleMaster by Radian", **RADIAN Corporation**, Austin, Texas.
- Scarl E. A.; Jamieson J. R.; Delaune C. I. (1985) "Process Monitoring and Fault Location at the Kennedy Space Center", **SIGART Newsletter**, juillet, no. 93, p. 38-44.
- Shortliffe, E.; Buchanan, B. (1984) **Ruled-Based Expert Systems**, Addison-Wesley.
- Smith, J.; Biswas, G. (1989) "Multi-level Models for Diagnosis of Complex Electro-mechanical Systems", **Applications of Artificial Intelligence VII**, 28-30 mars, Orlando, Floride, SPIE, vol. 1095, p. 346-356.
- Storr, A.; Härdtner, M.; Diehl, G.; Schneider, J. (1987) "New Diagnostic Methods of Faults External to the Controller at Manufacturing Systems", **Diagnostic and Preventive Maintenance Strategies in Manufacturing Systems**, Milacic V. et McWaters J.F. (éditeurs), Yougoslavie, p. 43-63.
- Van de Velde, W. (1985) "Naive Causal Reasoning for Diagnosis", **Cinquièmes journées internationales : les systèmes experts et leurs applications (Avignon-85)**, 13-15 mai, Avignon, France, p. 455-473.
- Waterman, D. (1986) **A Guide to Expert Systems**, Addison-Wesley.

2. Références complémentaires

- Ancelin J.; Cherioux F.; Gausset JP; Legaud P.; Marion B.; Maurin S.; Pichot D.; Sancerni G. (1989) "Système de surveillance des sources électriques", **Symposium international pour la démonstration d'applications de systèmes experts dans l'industrie électrique**, Montréal, 7-12 mai 1989, p. 63-65.

- Bouche, M.; Planchu, V.; Retour, D. (1986) "Les systèmes experts appliqués à la maintenance modifient-ils la donne?", **Systemes experts en maintenance**, Gabriel M. et Rault J.C. (éditeurs), Masson, Paris, p. 102-112.
- Carey, J. (1988) "The Role of Software in Predictive Maintenance", **Noise and Vibration Control Worldwide**, mars, p. 86-87.
- Cornille, J.-M.; Meller, A.; Ruhla, J. (1987) "Le système expert de maintenance PEDRO : Bilan et perspectives", **Septièmes journées internationales : les systèmes experts et leurs applications (Avignon-87)**, 13-15 mai, Avignon, France, p. 667-686.
- David, J.-M.; Krivine, J.-P. (1987) "Utilisation de prototypes dans un système expert de diagnostic : le projet DIVA", **Septièmes journées internationales : les systèmes experts et leurs applications (Avignon-87)**, 13-15 mai, Avignon, France, p. 889-907.
- Delorme, C.; Giambiasi, N.; Lbath L.; Roux, P. (1987) "THESEE : un système expert d'aide à la génération de vecteurs de test", **Systemes experts en maintenance**, Gabriel M. et Rault J.C. (éditeurs), Masson, Paris, p. 39-51.
- Del Pozo (1988) "SEPIDE: An Expert System Application to the Analysis of Network Events", **Expert Systems Application to Power Systems**, 22-26 août, Stockholm-Helsinki, The Royal Institute of Technology, p. 4.1-4.9.
- Dormoy, J.-L. (1987) **Résolution qualitative: complétude, interprétation physique et contrôle. Mise en œuvre dans un langage à base de règles: BOOJUM**, Thèse de doctorat de l'université Paris 6, soutenue le 14 décembre.
- Dormoy, J.-L. (1988b) "Assembling a Device", **Seventh National Conference on Artificial Intelligence (AAAI-88)**, 21-26 août, Saint-Paul, Minnesota, p. 319-323.
- Dormoy, J.-L. (1988c) "Controlling Qualitative Resolution", **Seventh National Conference on Artificial Intelligence (AAAI-88)**, 21-26 août, Saint-Paul, Minnesota, p. 330-335.
- Duval, M. (1989) "Acceptable Dissolved Gas-in-oil Concentration Levels in Power and Instrument Transformers versus Age", **Minutes of the 1989 Doble Conference**, avril.
- Falkenhaimer, B.; Forbus, K. (1988) "Setting-up Large-scale Qualitative Models", **Seventh National Conference on Artificial Intelligence (AAAI-88)**, 21-26 août, Saint-Paul, Minnesota, p. 301-306.
- Forbus, K. D. (1987) "Interpreting Observations of Physical Systems", **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics**, vol. SMC-17, mai/juin, p. 350-359.
- Fournié, R.; Guitton, J.; Hérouard, M.; Magnon, B.; Maujean, J.M. (1988) "Essais d'évaluation et méthodes de diagnostic pour estimer la durée de vie et détecter les défaillances des matériels électriques installés dans les centrales", **E.D.F.**

bulletin de la Direction des Etudes et Recherches : série B, Réseaux électriques, Matériels électriques, no. 4, p. 45-53.

- Fustar, S.; Hiesh, J. (1988) "A Knowledge-Based Method for Revision of Yearly Generator Maintenance Schedule", **Expert Systems Application to Power Systems**, 22-26 août, Stockholm-Helsinki, The Royal Institute of Technology, p. 9.23-9.29.
- Goupil, D.; St-Jacques, C. (1989) **Introduction aux systèmes experts**, Cours des laboratoires du CRIM, 1550 de Maisonneuve O., bureau 1000, Montréal H3G 1N2, mars.
- Kabourakis, M.; Mylopoulos, J.; Stanley, M.; Jarke, M. (1988) **Telos: A Knowledge Representation Language for Requirements Modelling**, Department of Computer Science, Université de Toronto, 16 décembre.
- Jones, T. (1983) "Predictive Maintenance and Cost Control", **The Certificated Engineer**, août, p. 112-118.
- Khirwadkar, P.G. (1977) "Operation and Maintenance Program for Power Generation", **Indian Journal of Power & River Valley Development**, décembre, p. 434-436.
- Léonard, F.; Pastorel, H. (1987) "On-line Monitoring for Predictive Maintenance of Hydro Power Plants", **IEEE Montech-87 (Compint-87)**, 9-12 novembre, p. 253-257.
- Loewen, T.; Perricone, F. (1986) "Rotating Equipment Vibration Monitoring and Diagnosis Experience at Candu Nuclear Power Plant", **Second EPRI Incipient-Failure Detection Conference**, octobre, p. 1.1-1.19.
- Marin, M.; Jasmin, J.-L. (1989b) "Cooperating Expert Systems for Diagnosis of Electrical Apparatus", **Expert system applications for the electric power industry (EPRI)**, 5-8 juin, Orlando, Floride (à paraître).
- Marin, M.; Jasmin, J.-L. (1989c) "Concept of Verdict Incorporating Expert Systems for Diagnosis of Electrical Apparatus", **Power HighTech-89 (IASTED)**, 4-7 juillet, Valence, Espagne (à paraître).
- Marin, M.; Mychaltchouk P. (1989d) "Implementing Data Board Concept for SEDA Cooperating Systems", **Canadian Conference on Electrical and Computing Engineering**, Montréal, septembre 17-20 (à paraître).
- Markkanen H.; Saarela O. (1989) "A Knowledge-Based System for Trouble-Shooting of Power Plant Processes", **Symposium international pour la démonstration d'applications de systèmes experts dans l'industrie électrique**, Montréal, 7-12 mai, p. 43-48.
- McElroy, J.; Scheibel, J. (1987) "On-Line Diagnostic Monitoring", **InTech**, décembre, p. 29-32.
- Milacic, J.; Majstorovic, V. (1988) "The Future of Computerized Maintenance", **Diagnostic and Preventive Maintenance Strategies in Manufacturing Systems**, Milacic V. et McWaters J.F. (éditeurs), North-Holland, p. 139-181.

- Milne, R. (1986) "Fault Diagnosis & Expert Systems", **Sixièmes journées internationales : les systèmes experts et leurs applications (Avignon-86)**, 28-30 avril, Avignon, France, p. 603-612.
- Milne, R. (1987) "Strategies for Diagnosis", **IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics**, vol. SMC-17, mai/juin, p. 333-339.
- Milne, R.; Eldridge, R. (1988) "Reasoning about Relationships", **Huitièmes journées internationales : les systèmes experts et leurs applications (Avignon-88)**, 30 mai-3 juin, Avignon, France, p. 467-478.
- O'Hare, G.; Black, W.; Conroy, G. (1987) "Predictive Maintenance: A New Paradigm for Diagnostic Expert Systems", **Diagnostic and Preventive Maintenance Strategies in Manufacturing Systems**, Milacic V. et McWaters J.F. (éditeurs), North-Holland, p. 205-218.
- Pichler, M.; Tranter, J. (1987) "Computer Based Techniques for Predictive Maintenance of Rotating Machinery", **Electric Energy Conference (EECON-87)**, 6-9 octobre, Adelaide, Australie, p. 216-225.
- Rault, A.; Baskiotis, C. (1986) "Fault Detection - Diagnosis and Predictive Maintenance", **27th Conference on Decision and Control (IEEE)**, Athènes, Grèce, p. 1593-1597.
- Reiter, R. (1987) "A Theory of Diagnosis from First Principles", **Artificial Intelligence**, vol. 32, p. 57-95.
- Richard, J.-P. (1986) "Les systèmes experts à la RATP : Bilan de la réalisation du système expert RUFUS d'aide à la maintenance des trains", **Systèmes experts en maintenance**, Gabriel M. et Rault J.C. (éditeurs), Masson, Paris, p. 113-118.
- St-Jacques, C. (1988) **Développement d'un système expert pour l'aide à la conception de systèmes d'information**, Thèse de maîtrise, Département d'informatique et de recherche opérationnelle, Faculté des arts et sciences, Université de Montréal.
- Saldanha, C. M. (1988) **An Algebraic Constraint System For Computer-Aided Design in Magnetics**, Masters thesis, Computational Analysis and Design Laboratory, Département de génie électrique de l'université McGill, Montréal, février.
- Saldanha, C. M.; Lowther, D. A. (1988a) "Device Modelling in an Electromagnetic Design System", **IEEE T-MAG**, MAG 23, p. 2644-2646.
- Saldanha, C. M.; Lowther, D. A. (1988b) "Knowledge-Based Computation of Electromagnetic Device Parameters", **IEEE T-MAG**, MAG 24, p. 334-337.
- Sahni, A.; Kastouri, P. (1977) "Diagnostic Testing of Electrical Equipment", **Indian Journal of Power & River Valley Development**, décembre, p. 449-452.
- Sembugamoorthy, V.; Chandrasekaran B. (1984) **Conceptual Representation of Devices and Compilation of Diagnostic Problem Solving Systems**,

Research report, Laboratory for AI Research, Dept of Computer Science, The Ohio State University.

Spur, G.; Specht, D.; Göbler, T. (1987) "Building an Expert System for Maintenance", **Diagnostic and Preventive Maintenance Strategies in Manufacturing Systems**, Milacic V. et McWaters J.F. (éditeurs), Yougoslavie, p. 183-203.

Stoa, P.; Botnen, A. (1989) "EKO - A Knowledge-Based Operator's Assistant", **Symposium international pour la démonstration d'applications de systèmes experts dans l'industrie électrique**, Montréal, 7-12 mai, p. 77-81.

Walters J.; Nielsen N. R. (1988) **Crafting Knowledge-Based Systems: Expert Systems Made Realistic**, Wiley & Sons.

Williams, B.C. (1984) "Qualitative Analysis of MOS Circuits", **Artificial Intelligence**, vol. 24, p. 281-346.

Winfield, E.; McCarroll, B. (1987) "Expert Systems in Predictive Maintenance", **AI in Manufacturing**, 14-17 octobre, Long Beach, Californie, p. 261-266.

ANNEXE

**Programme de simulation du comportement thermique
du transformateur durant son démarrage**

```
;; -*- Mode:Common-Lisp; Package:QSIM; Syntax:COMMON-LISP; Base:10 -*-
```

```
, SIMULATION DU COMPORTEMENT THERMIQUE DU TRANSFORMATEUR  
, Par Benoit Tiffou  
, Le 25 oct. 88
```

```
, Definition du nom du modele, des parametres et de leur de valeur (symbolique  
, define-QDE transformateur-c
```

```
(text "Temperature du transformateur.")  
'quantity-spaces  
  (I (0 I*))  
  (QNi (0 Q))  
  (QNm (0 Q))  
  (TN (0 T inf))  
  (DTN (0 DTN* inf))  
  (QNo (0 Q))  
  (QHo (0 Q))  
  (QHN (0 Q))  
  (TH (0 T inf))  
  (TA (0 T inf))  
  (DTH (0 DTH* inf))
```

```
, Description des relations
```

```
'constraints  
  ((d/dt TH QHn))  
  ((ADD QHo QHn QNo) (0 Q Q) (Q 0 Q))  
  ((ADD TA DTH TH) (T 0 T) (T INF INF))  
  ((M+ QHo DTH) (0 0) (Q DTH*))  
  ((ADD TH DTN TN) (T 0 T))  
  ((M+ QNo DTN) (0 0) (Q DTN*))  
  ((d/dt TN QNm))  
  ((ADD QNo QNm QNi)(0 Q Q) (Q 0 Q))  
  ((M+ I QNi) (0 0) (I* Q))  
)
```

```
; Declaration des parametres exogenes
```

```
(independent QNi TA)
```

```
, Declaration du parametre particulier a etudier
```

```
(history TH)
```

```
(print-names (QNo "Q sortant du noyau")  
             (QHo "Q sortant de l'huile")  
             (QHn "Q capte par l'huile")  
             (TH "Temperature de l'huile")  
             (TA "Temperature de l'air")  
             (DTH "DT entre l'huile et l'air")  
             (QNm "Q capte par le noyau")  
             (QNi "Q communique au noyau")  
             (DTN "DT entre le noyau et l'huile")  
             (I "Courant dans les enroulements")  
             (TN "Temperature du noyau"))
```

```
, Definition de l'affichage des resultats
```

```
(layout (QNi QNo QNm)  
        (QHn nil QHo)  
        (TA TN TH))
```

```
, Description ded l'etat initial
```

```
, defun demarrer-transformateur-c()
```

```
  ,let ((initial
```

```

      (make-initial-state transformateur-c
        '((TH (T nil))
          (TN (T nil))
          (TA (T std))
          (I (I* std))
          )
        "demarrage du transfo"))
    (qsim initial)
    (qsim-display initial)
  ))

```

```

; Ajouter l'exemple du transformateur a la bibliotheque des exemples
(add-to-catalog
 'demos
 '(transformateur-c
  ("q:examples;transformateur-c")
  nil
  ((PI nil (demarrer-transformateur-c))))))

```