

**Zeitschrift:** Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

**Herausgeber:** Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

**Band:** 84 (1993)

**Heft:** 23

**Artikel:** L'intelligence artificielle fait son entrée dans les centres de conduite : Sesam : un système expert modulaire pour l'analyse de sécurité d'un réseau de transport d'énergie électrique

**Autor:** Tinguely, Christian / Germond, Alain

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-902757>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 01.04.2025

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

L'analyse de sécurité constitue une part importante de l'exploitation d'un réseau électrique. Dans le cas d'une analyse systématique des contingences simples ou voire doubles, la nature combinatoire du problème nécessite un temps de calcul supérieur à celui disponible pour une analyse en temps réel. Parmi les récentes approches proposées dans les publications scientifiques, certaines font appel à l'utilisation de techniques d'intelligence artificielle et plus particulièrement aux systèmes experts. Un nouveau système expert modulaire, présenté dans cet article, est le résultat de l'application de ces techniques à l'analyse de sécurité des réseaux de transport d'énergie électrique.

# L'intelligence artificielle fait son entrée dans les centres de conduite

**Sesam – un système expert modulaire pour l'analyse de sécurité d'un réseau de transport d'énergie électrique**

■ Christian Tinguely et Alain Germond

Nul ne saurait contester l'importance primordiale de l'énergie électrique pour l'industrie, les services, les transports et notre vie quotidienne. Il est essentiel que le système Production-Transport-Distribution fonctionne de manière sûre et fiable. Cependant, la possibilité d'un incident de grande envergure subsiste. De manière à réduire la possibilité d'un tel incident, il est essentiel de connaître à chaque instant quels sont les incidents vulnérables pour le réseau.

Le Laboratoire de réseaux d'énergie électrique de l'EPFL étudie, depuis 1986, la possibilité d'appliquer les techniques d'intelligence artificielle aux réseaux électriques. Une première étape a consisté à développer un prototype de système expert en Prolog pour les ordres de manœuvre dans une sous-station [1]. Ce premier prototype a montré l'intérêt d'une telle approche.

L'analyse de sécurité d'un réseau électrique est une tâche difficile. La nature combinatoire et le temps de calcul non négligeable de la tâche laissent entrevoir l'intérêt d'une approche système expert. Le propos de cet article est de présenter le prototype d'un système expert modulaire, appelé Sesam, qui résulte d'une recherche financée par le Fonds

national pour la recherche énergétique (Neff). Après avoir défini la notion de sécurité en régime permanent, l'approche choisie est présentée. Les connaissances utilisées, plus particulièrement les principes considérés par Sesam seront brièvement présentés. La réalisation et l'évaluation de Sesam sont finalement discutées.

## L'analyse de sécurité d'un réseau électrique

### La notion d'analyse de sécurité

La fiabilité est une qualité intrinsèque à la manière dont le réseau de transport a été conçu, planifié, étendu. Elle est obtenue principalement grâce à:

- une exploitation maillée du réseau électrique
- un dédoublement de lignes et de transformateurs
- des interconnexions entre différents réseaux électriques.

La fiabilité qualifie le réseau à long terme. Au contraire, la sécurité doit être comprise comme la fiabilité instantanée. Deux principaux types de sécurité sont considérés:

- sécurité en régime permanent
- sécurité dynamique.

#### Adresses des auteurs:

Dr. Christian Tinguely, Laboratoire des réseaux d'énergie électrique, EPFL, 1015 Lausanne; depuis 1.4.93: Siemens AG Oesterreich, Gudrunstrasse 11, A-1100 Wien, et Prof. Dr. Alain Germond, Laboratoire des réseaux d'énergie électrique, EPFL, 1015 Lausanne.

La sécurité d'un réseau d'énergie électrique est une fonction déterministe, dépendante du temps et des conditions instantanées d'exploitation: «La sécurité d'un réseau électrique est la capacité du système à fonctionner normalement malgré des accidents non planifiés des équipements, appelés contingences» [2]. L'état normal de fonctionnement est aussi appelé état préventif. Dans l'état normal, le système génération-transmission fonctionne de manière à ce que les demandes de tous les consommateurs soient satisfaites à la fréquence standard, aux niveaux de tension de fonctionnement et sans violation des limites thermiques des ouvrages.

### Exigences pour une méthode d'analyse de sécurité

Les différentes techniques proposées dans les publications scientifiques [3-7] cherchent à déterminer les contingences critiques sans procéder à une analyse systématique et complète des différentes contingences à l'aide d'un calcul complet de répartition de puissance. Les deux exigences fondamentales d'une méthode d'analyse de contingences en temps réel sont:

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

### Sesam - une nouvelle approche pour l'analyse de sécurité

#### Les sources des connaissances

L'approche présentée ici a permis de développer un système expert modulaire. La fonction de Sesam est le traitement de la sécurité en régime permanent et plus particulièrement l'identification des contingences simples ou doubles qui créent des violations des contraintes thermiques. La source de connaissances est triple:

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

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

Afin d'analyser la situation courante du réseau électrique, le système expert doit posséder des modules qui puissent calculer et analyser la topologie ou la charge des branches. De manière à réduire le temps de calcul nécessaire pour une analyse de sécurité, le principe choisi est de ne pas recourir à l'utilisation systématique d'un calcul de répartition de puissance pour déterminer le diagnostic de la contingence. Sesam comprend cependant un module de calcul de répartition de puissance pour déterminer les transits de puissance au cas où il ne serait pas capable d'établir un diagnostic par sa seule connaissance.

Le rôle principal du système expert est de gérer l'information à sa disposition et d'effectuer une synthèse des règles déclenchées pour déterminer la vulnérabilité du réseau face à la contingence analysée. Le résultat final attendu est une liste des contingences conduisant à des violations des contraintes thermiques avec une indication de la sévérité des violations pour chacune de ces contingences critiques.

#### Domaine des connaissances et architecture de Sesam

Les connaissances recueillies pour traiter le problème de la sécurité d'un réseau électrique par le système expert Sesam peuvent être classifiées en quatre groupes principaux:

- connaissances nécessaires pour déterminer de manière quantitative la vulnérabilité du système face à la contingence
- connaissances utilisées pour déterminer de manière qualitative la vulnérabilité du système face à la contingence

- connaissances nécessaires pour filtrer les contingences à présenter à l'utilisateur
- connaissances utilisées pour déterminer s'il existe des recommandations qui puissent permettre au réseau de retrouver un état sain.

L'architecture de Sesam est représentée à la figure 1. Seuls les deux premiers domaines de connaissances mentionnés ci-dessus font l'objet d'un développement dans le cadre de cet article.

#### Les coefficients d'influence de courant comme base de connaissances quantitatives

Les règles obtenues par une approche classique des systèmes experts, c'est-à-dire spécifiées par des experts, ne peuvent pas facilement être généralisées et appliquées à différents réseaux électriques. De manière générale, les contingences ont une influence sur un nombre restreint de branches. Au lieu de considérer un critère de proximité géographique, comme il est intuitivement légitime de le penser, il est préférable de considérer un critère basé sur l'évaluation de la distance électrique entre la branche ou les branches déclenchées et les autres branches du réseau électrique. Cette distance est utilisée pour déterminer la partie du réseau influencée par la contingence.

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

Une analyse systématique des contingences simples, pour un état de charge et de production du réseau considéré, permet de quantifier l'influence de chacune des branches déclenchées sur toutes les autres branches du réseau. L'influence de la branche déclenchée sur les autres branches est représentée par un coefficient d'influence de courant complexe  $\alpha_{bk}$  qui quantifie l'influence de la branche déclenchée  $k$  sur le courant circulant dans la branche  $b$ . Ce coefficient d'influence est défini de la manière suivante:

$$\alpha_{bk} = (L_b - L_{b0}) / L_k$$

$L_b$  Courant dans la branche  $b$  après le déclenchement de la branche  $k$

$L_{b0}$  Courant dans la branche  $b$  avant le déclenchement de la branche  $k$

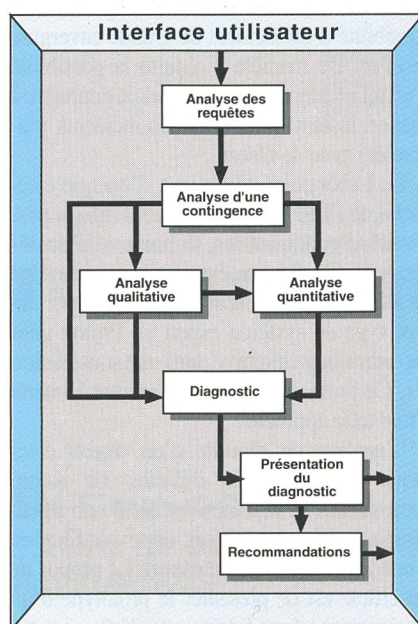


Figure 1 Architecture du système expert Sesam

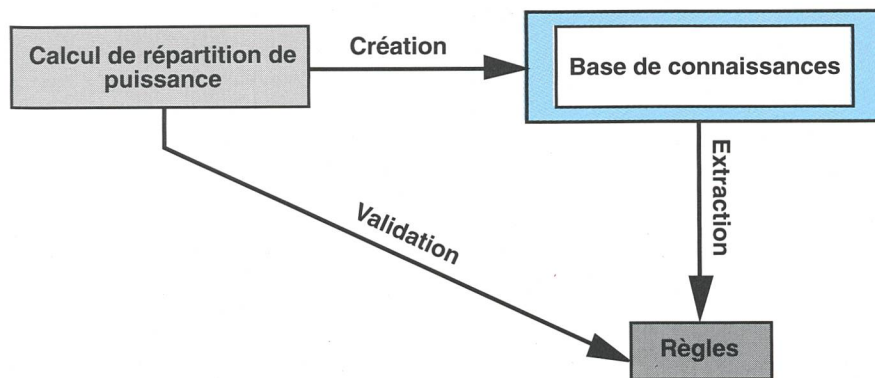


Figure 2 Principe de l'extraction des règles

$I_k$  Courant dans la branche  $k$  avant son déclenchement

$\alpha_{bk}$  Coefficient  $\alpha$  dimensionnel d'influence de courant pour la branche  $b$  dans le cas du déclenchement de la branche  $k$ .

La base de connaissances est créée en traitant systématiquement toutes les contingences simples, c'est-à-dire en calculant l'influence de chacun des déclenchements sur le courant qui circule dans les autres branches. L'ensemble des vecteurs de coefficients d'influence de courant ainsi obtenus constitue la base de connaissances. Elle peut être utilisée de deux manières différentes. La première utilisation consiste à déterminer l'état du réseau, c'est-à-dire les transits de puissance dans les branches du réseau suite à une contingence simple autour du point de fonctionnement pour lequel la base de connaissances a été établie. Il est également possible d'étendre la méthode au calcul des contingences doubles avec la base de connaissances correspondante au point de fonctionnement pour lequel elle a été établie [8].

La deuxième utilisation de la base de connaissances sert à valider et extraire des règles qui peuvent être ensuite utilisées en temps réel pour déterminer l'état du réseau suite à des contingences simples et doubles. Un des avantages de cette approche est de pouvoir extraire automatiquement des règles qui peuvent être validées en phase d'expérimentation, en comparant l'état du réseau obtenu à l'aide d'un calcul de répartition de puissance et l'état du réseau obtenu en considérant l'utilisation des règles extraites [9]. L'utilisation de ces règles permet de déterminer les contingences pour lesquelles il est possible d'estimer les transits dans les branches du réseau. La figure 2 illustre le principe de l'extraction des règles à partir de la base de connaissances.

### Comment traiter les connaissances qualitatives?

Le processus d'acquisition de connaissances vise à identifier, formuler et traiter la connaissance nécessaire à la résolution du

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

De manière à exploiter la connaissance contenue dans l'analyse de situations critiques par un opérateur, il est essentiel d'identifier le contexte de chacune des situations et la manière de juxtaposer les différents facteurs pris en considération. La connaissance recensée porte sur l'identification de situations critiques et sur des recommandations qui permettent au réseau de retrouver un état sain. Il a été également demandé aux opérateurs de mentionner une explication pour chacune des contingences critiques. Les principaux facteurs recensés auprès des experts pour caractériser le contexte dans lequel survient une situation critique dans une zone électrique sont les suivants:

- période de l'année
- température extérieure
- somme des productions dans la zone électrique
- somme de la demande des consommateurs
- débit des rivières
- niveau de charge des ouvrages inclus dans la contingence

- niveau de charge d'autres ouvrages considérés pour exprimer le contexte d'une contingence.

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

Cependant, ce mode de raisonnement est le plus souvent basé sur des connaissances et des données entachées d'incertitudes et d'imprécisions. L'imprécision de l'expression de la connaissance provient de la nature qualitative du langage. Les opérateurs raisonnent et pensent en utilisant des qualificatifs tels que chaud, froid, assez chaud au lieu de termes numériques précis, telle la température mesurée. De plus, les décisions sont généralement nuancées et non pas tranchées. Parallèlement, les connaissances recueillies auprès de différents experts ne sont pas totalement semblables. L'approche adoptée dans Sesam pour exploiter ces connaissances est basée sur la théorie de la logique floue. Elle prend en considération l'imprécis et l'incertain associés à un élément de connaissance.

### Approche basée sur la notion de sous-ensemble flou

Un sous-ensemble flou est simplement une collection d'objets. L'utilisation d'ensembles traditionnels imposent l'appartenance rigide de chacun des objets à l'ensemble. Un objet appartient totalement à l'ensemble ou il n'en fait pas partie. Par exemple, l'ensemble des températures chaudes peut être défini comme toutes les températures comprises entre 20 et 25 degrés. Par conséquent, il n'est pas possible d'associer l'attribut «chaud» à une température de 19,5 degrés. Cette distinction imposée par l'utilisation d'ensembles rigides apparaît comme irréaliste. Pour remédier à la rigidité des ensembles traditionnels, la notion de sous-ensemble flou a été introduite par Lofti Zadeh. La notion de flou permet d'adapter un modèle de connaissance au contenu évolutif et incertain de son environnement.

Les sous-ensembles flous permettent de considérer une relation d'appartenance partielle d'un objet à un sous-ensemble tout en garantissant une transition graduelle de l'appartenance à la non-appartenance au sous-ensemble flou (figure 3). Un sous-ensemble flou  $A$  appartenant au référentiel  $D$  est spécifié par une fonction d'appartenance  $\mu_A(x)$  à valeur définie dans  $[0,1]$ .  $\mu_A(x)$  constitue le degré d'appartenance de  $x \in A \subset D$ .

Contrairement à une distribution de probabilités, la somme des événements d'une fonction d'appartenance ne doit pas être égale à 1.

Les règles comprenant de la logique floue sont semblables aux règles de production traditionnelles d'un système expert. Elles comprennent une partie prémisses constituée d'une ou plusieurs propositions floues et une conclusion comprenant une ou plusieurs conséquences ou actions. De manière générale, une proposition floue est de la forme « $X$  est  $F$ ».  $X$  est une variable qui peut prendre des valeurs comprises dans le référentiel  $D$ , et  $F$  constitue un sous-ensemble flou. Le terme de proposition floue est utilisé pour parler d'une proposition dont la vérité est affirmée tout en sachant qu'elle contient du flou.

Le raisonnement par classification nécessite la comparaison de deux propositions où la première « $X$  est  $A$ » est donnée. Cette première proposition est mise en relation avec la deuxième proposition « $X$  est  $B$ ».  $B$  constitue un sous-ensemble flou associé au référentiel  $D$ . La première proposition est filtrée sur la base de la deuxième proposition, de manière à déterminer son acceptation. La comparaison des deux propositions peut être caractérisée par deux quantités,  $P(B/A)$  et  $N(B/A)$ , qui représentent respectivement la possibilité et la nécessité que « $X$  soit  $B$ » tout en sachant que « $X$  est  $A$ ». Par exemple, cela signifie la possibilité et la nécessité que la température soit chaude tout en sachant que la température est de 25 degrés. Sur la base de ces deux mesures, la proposition floue est acceptée ou refusée [10].

Les différents facteurs considérés par les experts d'un réseau électrique pour l'analyse de sécurité doivent être exprimés sous la forme de variables floues avant de pouvoir être utilisés dans un système expert. Les variables floues se réfèrent aux quantités physiques considérées, comme la température ou la demande dans une zone électrique. A chaque description linguistique («très froid», «chaud», etc.), associée à une variable floue

(p.ex. la température), correspond un sous-ensemble flou.

### Règles comprenant des propositions floues et non floues

Chaque règle [11] dans la base de connaissances comprend une prémisses et une conclusion. La prémisses est constituée d'une combinaison de propositions floues et non floues. Si toutes les propositions sont acceptables, la conclusion de la règle indique si la contingence est critique ou non. Pour une contingence critique, une liste des principaux ouvrages surchargés est spécifiée. La conclusion de la règle peut également comprendre une liste d'actions à effectuer par l'opérateur pour permettre au réseau de réintégrer un état normal. Un exemple de règle est présenté ci-dessous. Les quatre premières conditions ci-dessous ne sont pas floues et permettent d'identifier rapidement si la règle peut s'appliquer à la contingence considérée. Par contre, les cinq conditions suivantes doivent être analysées en appliquant un filtrage flou, de manière à déterminer leur acceptabilité sur la base du point de fonctionnement du réseau et des grandeurs physiques extérieures (température, etc.):

- SI Identification de la zone électrique est 2
- ET Type de contingence est un déclenchement simple d'une ligne 220 kV
- ET Nœuds aux deux extrémités de l'ouvrage sont Bus 23 et Bus 216
- ET Période d'exploitation est hiver heure pleine
- ET Température est froide
- ET Production de la zone électrique est faible
- ET Demande de la zone électrique est élevée
- ET Niveau de charge de la ligne est environ de 80%
- ET Niveau de charge du transformateur Bus 33-Bus 23 est environ de 75%
- ALORS Contingence est critique et les lignes suivantes sont probablement surchargées:

- Bus 23-Bus 21
- Bus 13-Bus 12, Bus 12-Bus 116, Bus 116-Bus 112, Bus 112-Bus 117.

### Réalisation et validation du système expert

#### Généralités

Il faut clairement distinguer le système expert, c'est-à-dire la forme sous laquelle il sera mis à disposition de l'utilisateur final, et l'ensemble des outils mis en œuvre pour le développer. Le système expert est dédié à une application déterminée, par exemple l'analyse de sécurité. Ce système est considéré comme fermé, car son évolution est garantie uniquement dans le cadre de l'application pour laquelle il est destiné. A l'opposé, les outils génériques de systèmes experts sont utilisés pour le développement d'applications et sont par conséquent considérés comme des systèmes ouverts. Actuellement, il existe sur le marché un grand nombre d'outils plus ou moins sophistiqués pour le développement de systèmes experts. Ces différents outils peuvent être regroupés en deux classes principales:

- les outils de base
- les générateurs d'applications (shells).

Les outils de base comprennent non seulement les langages procéduraux classiques tel que le langage C, mais également des langages de programmation développés pour les besoins de l'intelligence artificielle (Lisp, Prolog).

Les générateurs d'applications sont des outils qui simplifient considérablement le travail de développement des systèmes experts. Ils ne nécessitent pas l'écriture du moteur d'inférence et les différents outils nécessaires pour son exploitation. En contrepartie, ils ne permettent pas d'assurer une vitesse d'exécution rapide en comparaison de celle offerte par un langage classique de programmation comme le langage C. Ils fournissent cepen-

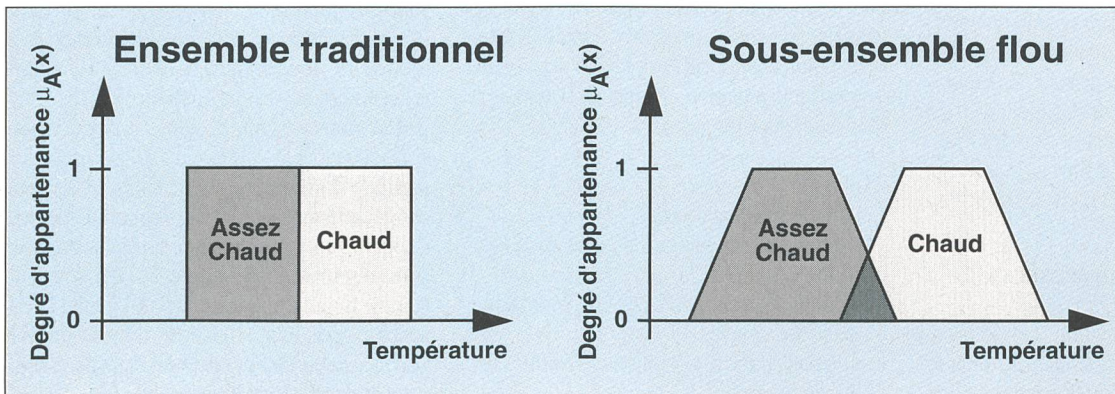


Figure 3 La notion de sous-ensemble flou

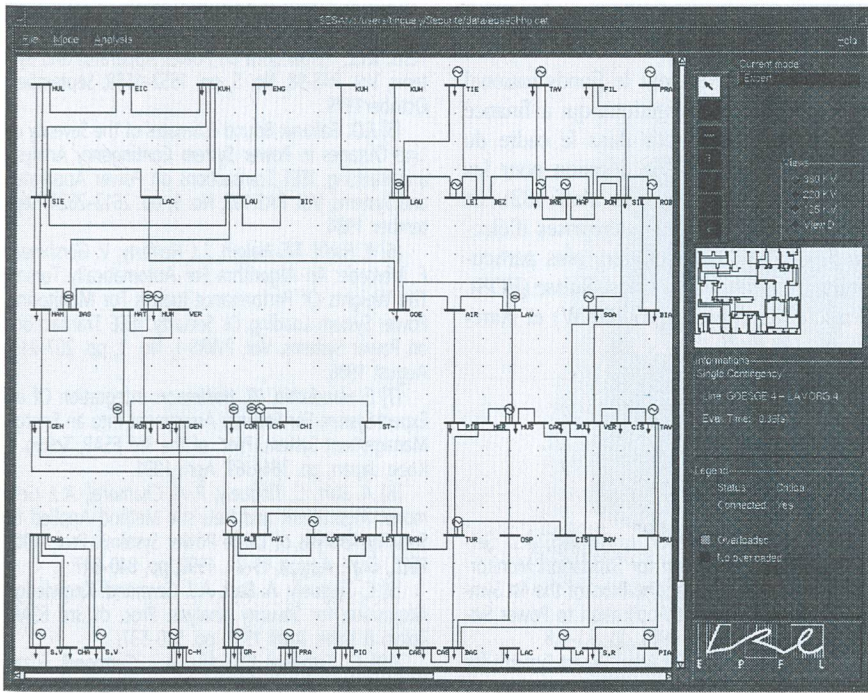


Figure 4 Interface graphique du système expert Sesam

dant la possibilité de développer de nouveaux outils en faisant appel à un langage comme le C, Lisp. Ils permettent l'acquisition et la représentation de la connaissance propre au domaine. Ces générateurs de systèmes experts comprennent des éditeurs pour introduire, modifier et structurer la connaissance; des facilités d'entrée-sortie pour interfacer le système avec d'autres langages ou produits commerciaux et finalement, des mécanismes d'inférence sophistiqués comme ceux décrits dans l'article [11]. Les principales caractéristiques des outils de développement de systèmes experts sont les suivantes:

- méthodes de représentation de connaissances
- complexité des mécanismes d'inférence disponibles pour exploiter la base de connaissances
- portabilité de l'application sur différentes plates-formes
- qualité de l'interface pour la conception du système expert
- coût de l'outil.

#### La réalisation de Sesam

En ce qui concerne Sesam, le choix a été effectué en insistant sur la disponibilité de mécanismes de représentation et d'inférences sophistiqués. De par la nature hybride du système expert, il est également nécessaire de disposer de facilités d'entrée-sortie. En analysant les différents produits du marché informatique, en tenant également compte de la disponibilité de stations de travail Unix HP-Apollo, le choix s'est porté sur l'utilisation de

Nexpert Object de la société Neuron Data. Dans sa version complète, Nexpert comprend d'une part un interface graphique utilisé pour spécifier les règles appliquées aux objets de la base de faits. L'interface permet de visualiser pas à pas le raisonnement en cours. Finalement, les règles peuvent être déclenchées aussi bien en chaînage avant que arrière [11]. D'autre part, Nexpert comprend une librairie écrite en C qui permet d'accéder et modifier toutes les ressources courantes de l'application. Ce ne sont que quelques-unes des principales caractéristiques de Nexpert.

Plusieurs logiciels commerciaux fournissent de l'aide pour la réalisation d'interfaces graphiques. Les plus récents génèrent automatiquement le code minimal nécessaire au fonctionnement de base de l'application. Parmi ceux-ci, le logiciel Open-Interface de la société Neuron Data, utilisé dans le cas de Sesam, permet en plus la portabilité de l'application développée sur l'ensemble des plate-formes du commerce (PC, Macintosh, Unix, VMS, etc.). Dans sa version de développement, Open-Interface propose d'une part un puissant et convivial éditeur pour le design de l'interface de base (placement des éléments, disposition des boutons, définition des menus, etc.) et d'autre part une librairie pour la gestion des multiples ressources disponibles. La programmation est effectuée en langage C et le principe de programmation est semblable à celui de X-Window. L'interface graphique réalisé avec Open-Interface comprend trois modes distincts de fonctionne-

- définition des données électriques et graphiques
- acquisition des requêtes de l'opérateur (analyse systématique des contingences ou spécification individuelle en utilisant la souris)
- représentation graphique du diagnostic pour la requête spécifiée. Cette représentation est effectuée en utilisant le schéma en ligne du réseau (figure 4).

#### Validation de Sesam pour le réseau suisse à haute tension

Il y a principalement deux aspects sous-jacents à l'évaluation des performances d'un système expert. Le premier est de déterminer si le système expert est capable de résoudre le problème. Le deuxième aspect consiste à comparer le diagnostic du système expert avec une méthode capable de résoudre le même problème. Ces deux principaux aspects de l'évaluation visent simplement à identifier si Sesam répond à la fonction désirée.

Sesam a été validé en effectuant des analyses de sécurité pour le réseau suisse à haute tension 380 kV/220 kV et la partie ouest 125 kV du réseau. Quatre différentes situations de charge ont été considérées. Une situation d'été heure pleine et trois situations d'hiver dont une en période de faible charge et les deux autres en période de forte charge. Le modèle du réseau utilisé comprend au total 160 nœuds et 265 branches. L'évaluation de Sesam effectuée sous une forme limitée à partir de quatre différentes situations de charge permet de faire ressortir quelques-uns des points forts de cette approche [12]:

**Robustesse:** Les erreurs de diagnostic sont faibles pour les analyses de sécurité N-1 et N-2. En examinant plus en détail les contingences pour lesquelles le diagnostic est erroné, il apparaît que ce sont toujours des contingences conduisant le réseau dans un état où la charge d'une branche se trouve dans le voisinage ( $\pm 5\%$ ) de la limite thermique autorisée. Les résultats obtenus font ressortir le caractère robuste de l'approche choisie.

**Rapidité:** La comparaison des temps nécessaires pour une analyse systématique des contingences simples indique un gain de l'ordre d'un facteur 5 par rapport à une approche classique basée sur un calcul de répartition de puissance (Newton Raphson découplé rapide). En utilisant une station de travail Unix HP-Apollo série 9000, modèle 710 (59 MIPS) et le réseau suisse traité, le temps nécessaire pour une analyse de sécurité N-1 est de 70 secondes. Ces résultats permettent d'envisager une exploitation en temps réel. De même pour l'analyse de sécurité N-2, le gain de temps obtenu est de l'ordre d'un facteur 7 et l'analyse complète sur la même machine nécessite en moyenne 2 heures. En considérant les objectifs à atteindre pour une

méthode d'analyse de sécurité, l'approche proposée satisfait le compromis à trouver entre rapidité et précision de la méthode pour l'analyse de sécurité N-1. Une analyse systématique des contingences doubles en temps réel n'est pas envisageable pour le moment.

**Flexibilité:** Cette approche est relativement flexible car les connaissances spécifiques au réseau traité sont indépendantes de la base de règles et de faits. Seules les règles recueillies auprès des exploitants dépendent du réseau traité, mais celles-ci sont contenues dans une base de règles indépendante. Les connaissances propres à l'analyse de situations antérieures, c'est-à-dire utilisées pour la création d'une base de connaissances quantitatives, peuvent être facilement générées à partir de différents points de fonctionnement pour le réseau considéré.

**Possibilité d'extension:** En choisissant une approche système expert, il est en tout temps possible d'ajouter ou d'enlever des règles. Le prototype développé comprend quelques 200 règles de base qui assurent le fonctionnement logique du processus de recherche de diagnostic. A côté de ces règles de base qui constituent le noyau du système expert, il est possible d'enrichir le système de règles propres au réseau considéré. Ces règles sont introduites sous forme d'une description en langage naturel qui ne nécessite aucune connaissance spécifique de Nexpert Object.

### Conclusion

L'analyse de sécurité en temps réel d'un réseau électrique reste un obstacle de par sa nature combinatoire. Le recours à une approche système expert, comme alternative à une approche classique basée sur l'utilisation d'un calcul de répartition de puissance, permet de réduire le temps de calcul nécessaire tout en assurant un diagnostic de qualité. La prise en considération de connaissances diverses (quantitatives et qualitatives) par Sesam a été rendue possible grâce à l'adoption d'un outil de développement de système expert puissant. La combinaison de plusieurs techniques d'intelligence artificielle (programmation objet, règles de production, logique floue) et d'informatique classique (Fortran, C) fournit une solution appropriée à la recherche d'un diagnostic pour une contingence.

L'évaluation effectuée, à l'aide d'un nombre restreint de situations de charge, a mis en évidence les qualités de la fonctionnalité offerte par Sesam. Il s'agit maintenant de pouvoir intégrer Sesam dans un centre de conduite (interfacer avec le Scada) de manière à vérifier les performances obtenues en laboratoire et bénéficier de son utilité.

### Remerciements

Les auteurs remercient le Fonds national pour la recherche énergétique qui a financé en partie cette recherche dans le cadre du projet «Outil d'aide à la décision pour les centres de conduite» (projet Neff 482). Ils remercient également les entreprises d'électricité pour leur collaboration, plus particulièrement l'Energie de l'Ouest-Suisse (EOS), Bernische Kraftwerke AG (BKW) et Aare-Tessin AG (Atel).

### Références

- [1] M. Stalder, D. Niebur, L. Palmieri, A.J. Germond: A Rule-based System for Substation Monitoring - The Switching Operations. Proc. of the 1st Symposium on Expert Systems Application to Power Systems, Stockholm-Helsinki, 1988, pp. 6.1-6.8.
- [2] R.D. Christie, S.N. Talukdar: Expert Systems for On Line Security Assessment. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 3, No. 2, May 1988, pp. 654-659.
- [3] G.C. Ejebe, B.F. Wollenberger: Automatic Contingency Selection. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-98, No. 1, pp. 97-109, January/February 1979.

[4] G.D. Irissari, D. Levner: Automatic Contingency Selection for On-Line Security Analysis - Real-Time Tests. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-98, No. 5, pp. 1552-1559, September/October 1979.

[5] F.D. Galiana: Bound Estimates of the Severity of Line Outages in Power System Contingency Analysis and Ranking. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-103, No. 9, pp. 2612-2624, September 1984.

[6] R. Fischl, T.F. Halpin, J.J. Helferty, V. Gershman, F. Mercede: An Algorithm For Automatically Tuning The Weights Of Performance Indices For Monitoring Power System Loading Or Security. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. PWRS-1, No. 3, pp. 207-213, August 1986.

[7] E. Handschin, W. Hoffmann: Integration Of an Expert System For Security Assessment Into an Energy Management System. Proc. of the 3rd ESAP, Tokyo & Kobe, Japan, pp. 364-369, April 1991.

[8] A. Bart, C. Tinguely, P.-A. Chamorel, A.J. Germond: Algorithmic and Heuristic Method Applied to Security Analysis of Large Power Systems. Proc. 10th PSCC, Graz, August 19-24, 1990, pp. 840-847.

[9] C. Tinguely, A. Bart, A.J. Germond: Knowledge Acquisition for Security Analysis. Proc. of 3rd ESAP, Tokyo & Kobe, April 1991, pp. 530-537.

[10] C. Tinguely, C.C. Liu, A.J. Germond: Fuzzy filtering for power system security assessment. Proc. of 4th ESAP, Melbourne, January 1993, pp. 593-599.

[11] D. Reichelt, H. Glavitsch: Entscheiden mit Expertensystemen. Bull. SEV/VSE 84(1993)1, pp. 27-33.

[12] C. Tinguely: Système expert pour l'analyse de sécurité. Thèse 1089, EPFL, 1992.

## Höhere Sicherheit elektrischer Netze dank künstlicher Intelligenz

### Sesam - ein modulares Expertensystem für die Analyse der Sicherheit elektrischer Energieübertragungsnetze

Die Sicherheitsanalyse ist eine wichtige Teilaufgabe der Betriebsführung elektrischer Netze. Eine systematische Analyse aller möglichen einfachen oder gar doppelten Fehler ist aber wegen der grossen kombinatorischen Anzahl der Möglichkeiten aus Zeitgründen im allgemeinen nicht durch Echtzeitrechnungen möglich. Aus diesen Gründen wird in der neueren Literatur zunehmend ein Einsatz der künstlichen Intelligenz und insbesondere von Expertensystemen empfohlen. Im vorliegenden Artikel wird unter der Bezeichnung Sesam ein solches Expertensystem für die Analyse der Sicherheit elektrischer Energieübertragungsnetze beschrieben; es ist in der Lage, komplette N-1- und N-2-Analysen durchzuführen oder Diagnosen für spezifische Störfälle zu erstellen.

Nach einer Vorstellung des Konzeptes dieses Expertensystems (Fig. 1) werden die verschiedenen Formen des Wissens und ihre Quellen dargestellt. Die Wissensbasis dieses Expertensystems wird hauptsächlich aus drei Quellen gewonnen und zu Regeln verarbeitet: aus dem Wissen von Experten, aus Berechnungen der Netzzustände (Figur 2) und aus Erfahrungen von früheren Situationen. Das vorgestellte Expertensystem kann mit Hilfe der Fuzzy-Logik auch unscharfe Informationen verarbeiten; die Methode wird im Artikel kurz beschrieben. Die auf der Basis von Open-Interface (Neuron Data) realisierte Bedienungsfläche stellt je einen Modus für die Eingabe der elektrischen und graphischen Daten, für die Definition der bezüglich Sicherheit zu untersuchenden Netzzustände sowie für die Ausgabe der Resultate und Diagnosen (Figur 4) zur Verfügung. Mit Sicherheitsanalysen im schweizerischen Hochspannungsnetz konnte die Funktionstüchtigkeit des Expertensystems bestätigt werden.

S.P.I.D.E.R. –  
Netzleitsysteme für  
Energieversorgungen



# Netzleitsysteme à la carte.

Energieversorgungsunternehmen stehen einem wachsenden Leistungsbedarf gegenüber.

Erforderlich sind wirkungsvolle Energiemanagement-Systeme und Lastführungs-Konzepte.

S.P.I.D.E.R. steht für ein Gesamt-Konzept von Netzleitsystemen für Energieversorgungen.

Das Angebot reicht à la carte vom kleinen auf PC basierenden SCADA-System bis zum umfangreichen Energiemanagementsystem auf VAX oder RISC-Computern.

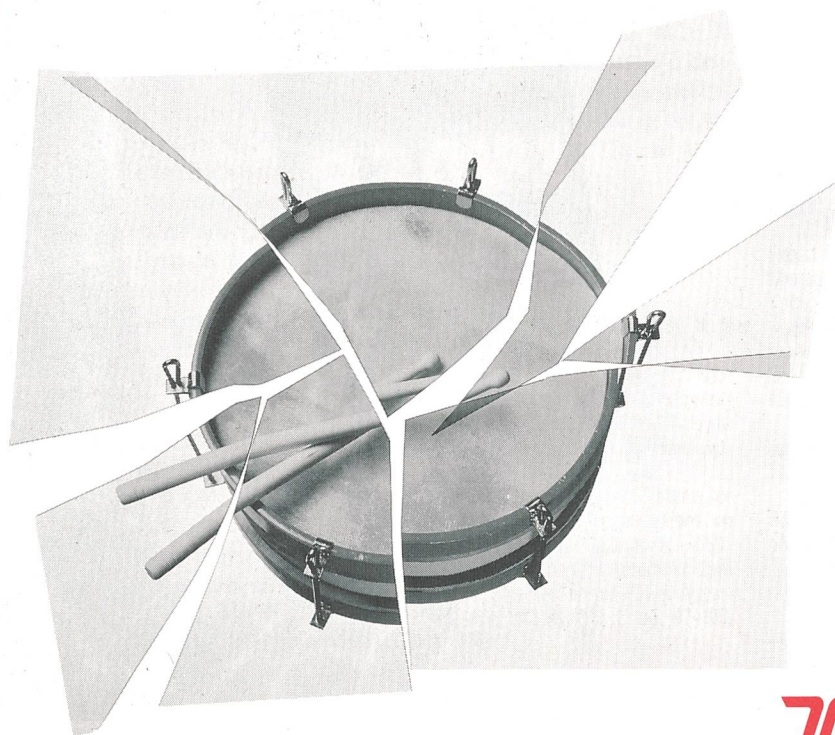
Dies und die offene Systemarchitektur garantieren, dass auch bei ständig wachsenden Bedürfnissen Ausbauwünsche realisierbar sind. ABB ist in der Energietechnik weltweit führend. Deshalb sind wir Ihr richtiger Partner.

*Wir stehen gerne zu Ihren Diensten.*

ABB Netcom AG  
CH-5300 Turgi/Schweiz  
Tel. 056/79 44 55  
Fax 056/79 23 40  
Telex: 755 749 abb ch



Bei bestimmten Schadenfällen waren wir bisher sprachlos.  
Mit dem neuen TeleAlarm nicht mehr.



TeleAlarm kann zwar nicht verhindern, dass in der ARA, im Unterwerk oder in einer anderen Anlage etwas passiert. Aber TeleAlarm verhindert, dass noch mehr passiert. Weil die neuen Systeme nicht einfach nur telefonisch Alarm schlagen. Sondern den Schaden präzise lokalisieren und unmissverständlich weitermelden. Satz für Satz, in beliebigem Wortlaut und in fast beliebiger Länge.  
Weitere Informationen: ebenfalls per Telefon: 01 821 91 00.

Kriesbachstrasse 3  
8600 Dübendorf

**TELECTRONIC**



## Die neue Schlanke zum Aufschnappen

### Aus 3 mach' 1 – Die Woertz–Dreistock–Klemme

#### **Schlank** bei Montagezeiten:

Sie ist im Gegensatz zu anderen Dreistock–Klemmen einfach nur auf die Tragschiene aufschnapp– und lösbar und lässt sich mit einer Neutralleiter–Sammelschiene verbinden; ausserdem muss nur noch eine statt drei Klemmen auf die Tragschiene aufgebracht werden.

#### **Schlank** im Platzverbrauch:

Mit einer Rasterbreite von 6 mm spart sie den Raum, den sonst zwei weitere Klemmen einnehmen würden.

#### **Dick** in der Qualität:

Sie wird als einzige Dreistock–Klemme nach internationaler Norm für Qualitätsmanagement ISO 9001 / EN 29001 in der Schweiz hergestellt und ist mit den üblichen Woertz–Bezeichnungsschildern Typ RB/6x9 beschriftbar.

**woertz**

Elektrotechnische Artikel  
Installationssysteme



Woertz AG, Hofackerstrasse 47, CH – 4132 Muttenz 1  
Tel. 061 / 59 33 33, Fax 061 / 61 96 06