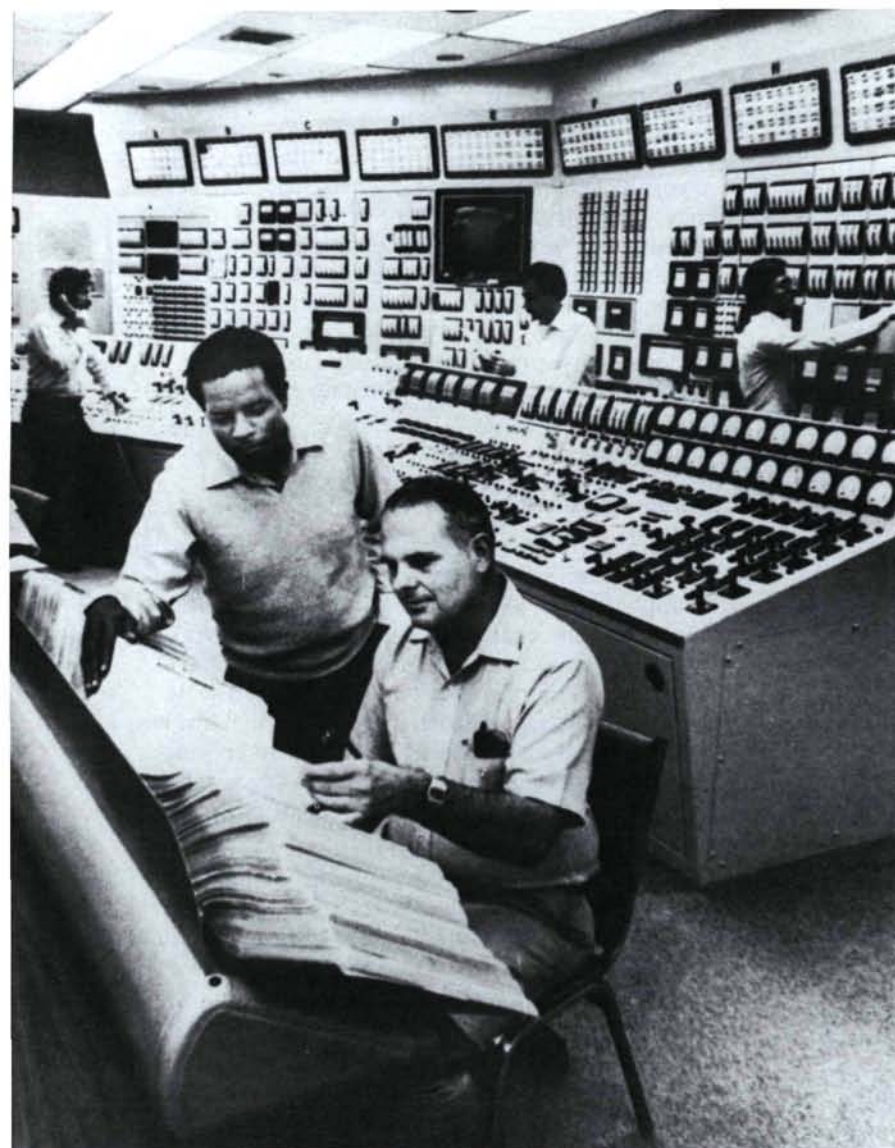

Le simulateur de la centrale nucléaire de Surry, en Virginie. (Photo: INPO)

Technologie de la simulation et formation de l'exploitant

Le simulateur total adapté à la centrale est devenu réalité

par Thomas Perkins



Vers la fin des années 60 et au début des années 70, l'industrie nucléo-électrique des Etats-Unis a entrepris de former le personnel d'exploitation des centrales nucléaires au moyen de simulateurs. Pendant cette période, les quatre fournisseurs américains d'installations nucléaires pour la production de vapeur industrielle ont créé leurs propres centres de formation, chacun étant équipé de son propre simulateur de centrale nucléaire. Des exploitants d'entreprises de services publics du monde entier y sont venus suivre des cours spéciaux d'exploitation.

A leur retour dans leurs installations respectives, les stagiaires ont reçu une formation complémentaire spécialement adaptée à ces installations. Dès la fin de 1978, l'intérêt de cette méthode de formation était reconnu dans le monde entier. Des centres équipés de simulateurs étaient ouverts au Canada, en Espagne, en France, au Japon, en République fédérale d'Allemagne, en Suède et au Royaume-Uni, ainsi qu'à Taïwan en Chine. Aux Etats-Unis, une norme nationale a été

adoptée en 1977 pour fixer les spécifications minimales des simulateurs destinés à la formation des opérateurs de centrales nucléaires. Cette formation portait essentiellement sur les procédures d'exploitation dans les conditions normales et comprenait l'étude de quelques scénarios d'accidents catastrophiques improbables. L'industrie nucléaire assurait au public que les dispositifs de sûreté incorporés aux réacteurs et aux salles de commande étaient capables de prévenir tout accident grave.

Or, le 28 mars 1979, un accident d'importance survenait à la deuxième unité de la centrale de Three Mile Island (TMI-2), Middletown, Pennsylvania. A la suite de cet événement, une évaluation critique fut faite de l'aptitude du personnel d'exploitation à faire face à de telles situations. Les résultats de l'enquête menée par la Commission Kemeny, et les recommandations de celle-ci au sujet des simulateurs, ont amené l'industrie nucléaire à reconsidérer sa conception de la formation des opérateurs.

Nombreux sont ceux qui pensent que l'accident ne se serait pas produit si les opérateurs avaient été convenablement formés, mais leur entraînement sur simulateur n'aurait pas suffi à l'éviter. En effet, les simulateurs en service à cette époque n'étaient pas programmés pour traiter une transitoire de réacteur impliquant la perte d'une grande quantité de fluide de refroidissement. A la

M. Perkins est directeur international à la Division des systèmes de simulation Link de la société Singer, à Silver Spring, Maryland.

Copyright 1985 The Singer Company, Link Simulation Systems Division. Le présent article ne peut être reproduit, en tout ou en partie, sans l'autorisation de cette société.

suite de cet accident, l'industrie nucléaire a décidé de procéder à une réévaluation de tout son programme de formation d'opérateurs.

La complexité des opérations, les qualités requises des opérateurs et l'importance que revêt la formation ont amené l'industrie et les pouvoirs publics à organiser des programmes complets de formation. Les méthodes traditionnelles d'apprentissage ne sont plus valables quand il s'agit de former des opérateurs de centrales nucléaires. L'ancienne formule consistant à exercer la main et non l'esprit est remplacée par un enseignement intégré et systématique visant la performance.

La complexité des centrales d'aujourd'hui exige que l'instructeur utilise essentiellement le simulateur pour enseigner et pour s'assurer de l'aptitude du stagiaire à s'acquitter correctement de sa tâche dans les conditions normales et anormales d'exploitation. L'acquisition d'un simulateur total adapté à une installation déterminée n'est qu'un des éléments que doit comporter un programme rationnel de formation. Un programme moderne bien intégré comprend des cours sur la théorie et les principes de l'exploitation complétés par des travaux pratiques sur simulateur. Les thèmes essentiels sont l'exploitation dans les conditions normales, les accidents les plus probables et l'interface homme-machine.

La simulation après l'accident de Three Mile Island

Le simulateur total d'une centrale reproduit exactement les tableaux d'affichage, les pupitres de commande et le poste de l'instructeur, le tout étant relié à un grand ordinateur digital. Les programmes informatiques qui ont été mis au point sont des représentations mathématiques des phénomènes physiques du fonctionnement des systèmes de la centrale et des fonctions de transfert des organes de commande.

Cette configuration est la même aujourd'hui qu'au début de 1979. La différence essentielle entre les simulateurs modernes et ceux d'alors réside dans la fidélité et dans la précision de la simulation, la fidélité concernant l'évolution des conditions normales et anormales d'exploitation et la précision s'appliquant aux tolérances en régime stable et dans les états transitoires (en d'autres termes, la fidélité est le degré de similitude entre la centrale considérée et sa représentation).

Nous allons voir maintenant quelles sont les caractéristiques principales du simulateur total d'une centrale.

La salle de commande

Le simulateur comporte normalement une reproduction fidèle et complète de tout l'équipement de la salle de commande de la centrale. A la demande du client, la reproduction peut être plus ou moins complète. Certains exploitants souhaitent une reproduction exacte de tous les tableaux arrière, de l'éclairage (y compris la baisse d'intensité au moment du démarrage des moteurs de grande puissance), des sons et même des bruits (turbines en marche, échappement de vapeur) que l'on perçoit au moment de l'ouverture des portes de la salle de commande. D'autres, en revanche, ne demandent que les tableaux des pupitres et parfois même certains d'entre eux seulement.

Vers la fin des années 70, un simulateur de type courant avait une capacité entrée/sortie de 6000 à 8000 (nombre d'instruments de salle de commande simulés). De nos jours, il n'est pas rare que cette capacité se situe entre 16 000 et 20 000. Outre les pupitres de la salle de commande principale, le tableau de télécommande de l'arrêt est reproduit dans une salle à part.

La simulation englobe d'autres équipements de la salle de commande principale, tels les systèmes intégrés de commande par ordinateur et les systèmes d'affichage des paramètres de sûreté. Avec la généralisation des systèmes d'affichage très perfectionnés, il est indispensable de familiariser les opérateurs avec l'affichage simultané sur écran et sur cadran classique.

Grâce à l'application générale de cette visualisation, la précision et la fidélité des modèles peuvent désormais être observées comme jamais elles ne l'ont été. Les nouvelles exigences qui en résultent font que les délais de livraison des simulateurs se prolongent et que les prix augmentent.

Des études sont en cours pour déterminer quelles sont réellement les conditions indispensables à une bonne formation des opérateurs. Les systèmes nécessaires à l'exploitation et à la surveillance à long terme des annexes de la centrale doivent-ils être inclus dans la simulation? Que faut-il pour former les opérateurs et quels autres membres du personnel feront un stage sur simulateur? Telles sont les questions que doit se poser tout organisme qui se propose d'acquiescer un simulateur total pour une centrale.

L'étendue de la simulation ainsi que les degrés de fidélité et de précision doivent être déterminés pour optimiser le rapport coût-efficacité qui assurera une bonne formation. Ce faisant, il ne faut pas perdre de vue la raison d'être essentielle du simulateur qui consiste à fournir au stagiaire suffisamment d'information pour qu'il puisse établir si la centrale fonctionne normalement ou anormalement, intervenir le cas échéant et observer la réponse à son intervention.

Le poste de l'instructeur

A mesure que s'accroît la complexité des simulateurs d'entraînement, le rôle de l'instructeur devient de plus en plus difficile. Celui-ci doit pouvoir, avec facilité et rapidement, introduire un défaut de fonctionnement, assumer le rôle d'opérateur auxiliaire, orienter les affichages, sans omettre surtout de surveiller le stagiaire. A cette fin, le poste de l'instructeur est équipé d'un écran à forte résolution pour visualisation graphique en couleur associé à un dispositif de mise en forme spécialement étudié, ce qui lui permet de composer rapidement les scénarios d'entraînement, sa tâche essentielle.

Un ensemble de touches de commande programmables, de sélecteurs de fonctions à curseur et de dispositifs d'entrée à micro-réglage lui font gagner un temps précieux au profit de ses stagiaires qui ne doivent cesser d'être sa principale préoccupation.

Le poste de l'instructeur doit normalement permettre d'exécuter les opérations suivantes:

- Initialiser à un état prédéterminé
- Geler tous les calculs
- Introduire un défaut de fonctionnement (immédiat ou logique)

- Fonctions d'opérateur auxiliaire
- Retour à un stade antérieur de l'exercice
- Surveiller la performance du stagiaire
- Asservir/mettre en panne l'instrumentation de la salle de commande
- Provoquer de fausses alarmes
- Temps accéléré ou ralenti
- Programmes d'exercices assistés par ordinateur
- Maîtrise des conditions environnementales et autres paramètres extérieurs.

Outre le pupitre de son poste, l'instructeur dispose d'une boîte de télécommande qu'il peut tenir dans la main, ce qui lui permet de se déplacer pour aller voir de près ce que fait le stagiaire, tout en continuant de diriger l'exercice.

Modèles de circuit primaire

Les spécifications qui ont été élaborées pour les simulateurs depuis l'accident de TMI précisent bien qu'il faut tenir compte des systèmes à deux phases et des processus de transfert de chaleur qui leur sont associés. Les fabricants se sont tous mis à étudier les moyens de satisfaire cette exigence et ont produit une nouvelle génération de simulateurs perfectionnés qui sont maintenant à la disposition des centres de formation des opérateurs de centrales nucléaires.

La société Link, par exemple, a mis au point un nouveau code en temps réel pour le cœur du réacteur et la thermohydraulique qui est l'élément central des nouveaux simulateurs qu'elle propose sur le marché. Il offre toutes les possibilités de prédiction d'un code thermohydraulique en plus de toute la gamme des fonctions opérationnelles d'un simulateur d'enseignement. Un ensemble d'affichage distinct, situé à côté du poste de l'instructeur, donne une information dynamique sur tous les paramètres nécessaires à l'analyse fine de l'aptitude de l'installation à transférer l'énergie depuis le réacteur jusqu'aux turbines ou autres sources froides. Le modèle est fondé sur des lois physiques et sur des équations constitutives fondamentales qui sont du même niveau que les meilleurs codes servant à l'analyse de la sûreté. Ses résultats sont les meilleures estimations que l'on puisse obtenir. La capacité de prévision de ces modèles de pointe permet de donner aux opérateurs une formation d'une profondeur et d'un réalisme encore jamais atteints.

Les principaux fabricants de simulateurs font actuellement la démonstration de leurs derniers modèles à l'intention des clients éventuels et, en fait, plusieurs simulateurs utilisant ces modèles sont à l'étude en Europe et aux Etats-Unis.

Base de données de conception et modifications ultérieures

La fidélité des modèles de systèmes de centrales est fonction directe de la qualité de la base de données de conception. La constitution et l'entretien de cette base de données est un travail qui demande beaucoup de temps à l'exploitant et au fabricant du simulateur.

Elle doit être bien définie et le propriétaire du simulateur doit disposer d'une base de données exacte et tenue à jour sur la centrale considérée. Chaque modification apportée à la centrale doit faire l'objet d'une évaluation et les changements correspondants doivent être introduits dans le simulateur. Il faut alors que la base de données du simulateur soit à son tour mise à jour pour tenir compte de ces changements. C'est pourquoi la plupart des simulateurs fabriqués de nos jours doivent comporter un système informatisé de gestion de la configuration.

Le propriétaire et le fabricant doivent travailler en étroite collaboration pendant toutes les phases du projet pour recueillir et collationner toutes les données disponibles applicables à la centrale de référence. Lorsque c'est possible, des données réelles d'exploitation, dont les transitoires en cas d'accident et de situation d'urgence, sont utilisées au stade initial de la conception. Si le simulateur est à l'étude avant ou en même temps que la centrale, il devra subir un réglage fin quand celle-ci sera prête à fonctionner. D'habitude, cette dernière mise au point est faite soit par le service du logiciel du propriétaire du simulateur, soit par le fabricant aux termes d'un contrat spécial.

La mise au point, de même que les modifications ultérieures des modèles mathématiques exigent une bonne connaissance de ceux-ci, afin de pouvoir aisément les modifier sans perturber le reste du logiciel. Pour faciliter cette tâche, il faut que les modèles des divers systèmes soient composés sous forme de modules et que leurs interfaces soient aussi réduites que possible. L'opération est encore rendue plus aisée par une technique de conception inversée dans laquelle un module de commande appelle un ou plusieurs segments de code qui, à leur tour, appellent divers composants et sous-programmes.

Grâce à cette structure modulaire et aux accessoires perfectionnés qui sont livrés avec le simulateur pour l'entretien de son logiciel, la plupart des propriétaires sont en mesure d'opérer pratiquement tous les changements souhaités sans devoir faire appel au fabricant.

L'ordinateur

On entend par ce terme tout le matériel informatique et le logiciel nécessaires à la mise en service et à l'exploitation convenables du simulateur. Cela comprend les interfaces entrée/sortie avec la salle de commande.

La plupart des fabricants de simulateurs dans le monde proposent aujourd'hui les ordinateurs Gould 32. L'ensemble que constitue l'ordinateur doit avoir une rapidité d'exécution, une capacité de mémoire et une flexibilité de programmation suffisantes pour répondre aux exigences de performance de la simulation.

En principe, l'ordinateur doit pouvoir assurer les opérations suivantes:

- Diriger les opérations de simulation
- Transmettre correctement les réponses en temps réel des interventions de l'opérateur stagiaire
- Conserver la maîtrise de tous ses dispositifs périphériques et de leurs fonctions prévues
- Disposer d'un affichage numérique comportant un nombre suffisant de positions pour assurer la précision spécifiée



Les simulateurs de centrale reproduisent une salle de commande déterminée: en haut, le simulateur de la centrale nucléaire du Susquehanna, aux Etats-Unis; en bas, celui de la centrale nucléaire CANDU «B» de l'Ontario Hydro Bruce, au Canada. (Photos: Link SSD et CAE Electronics Limited)



De l'avion à la centrale nucléaire et au-delà

Les simulateurs perfectionnés d'aujourd'hui que l'on destine à la formation des opérateurs de centrales nucléaires reposent sur plus d'un demi-siècle d'expérience des techniques de la simulation acquise dans l'industrie aérospatiale.

Au cours des 50 dernières années, les simulateurs de vol, qui n'étaient au début que de simples engins mécaniques conçus pour l'entraînement des pilotes, sont devenus des systèmes informatisés d'une grande complexité, capables de simuler des missions dans l'espace. C'est ainsi, par exemple, qu'avant le départ de la navette spatiale Columbia pour sa première mission, vers la fin de 1982, les membres de l'équipage et le personnel d'appui au sol avaient pu répéter leurs rôles respectifs depuis le lancement de la navette jusqu'à son retour sur la terre, grâce à des techniques de simulation.

De même que les simulateurs modernes de centrales nucléaires sont l'aboutissement d'une expérience antérieure, ils ouvrent la voie à maints types nouveaux de dispositifs étudiés pour servir à la formation d'opérateurs de centrales classiques et autres installations industrielles.

En fait, les centrales à combustible fossile ont eu recours dès 1977 à des simulateurs très perfectionnés

pour former leurs opérateurs. On rencontre ce genre d'équipement dans divers pays dont l'Afrique du Sud, l'Arabie Saoudite, l'Australie, les Etats-Unis d'Amérique, l'Inde, l'Indonésie, la République de Corée, la République fédérale d'Allemagne, ainsi qu'à Taïwan. On trouve d'autres types de simulateurs dans de nombreux autres pays.

Les industries de transformation ont été les dernières à recourir aux simulateurs pour former leur personnel d'exploitation. En réalité, elles les utilisent aussi à d'autres fins. La technique de simulation en temps réel confirme actuellement sa rentabilité dans la conception d'usines de transformation de grande complexité. En particulier, la fidélité de la simulation permet de mieux comprendre les problèmes et donne au chef de l'entreprise la possibilité d'apporter des modifications à la conception de son installation et à la commande des opérations avant, et même pendant la construction et la phase de démarrage. On a pu constater dans plusieurs cas que les économies de matériel et de temps ainsi réalisées dépassaient le coût du simulateur.

L'expérience acquise avec les simulateurs de centrales nucléaires a permis de réaliser des systèmes de simulation pour d'autres industries, tel celui-ci qui équipe une usine de traitement de gaz. (Photo: Link Simulation Systems Division)



- Assurer des taux suffisants de transfert entrée/sortie et d'itération des modèles mathématiques pour que les réponses de la centrale simulée affichées dans la salle de commande ne puissent être immédiatement distinguées de celles de la centrale réelle
- Participer à l'entretien du logiciel et à la modification des programmes par l'intermédiaire de compilateurs et d'un programme adaptés
- Participer au traitement de données de base parallèlement aux opérations de simulation, dans la limite des ressources et du temps disponibles
- Disposer d'une réserve suffisante de temps et de mémoire (intrinsèque ou annexe) pour accepter les modifications ultérieures.

L'ensemble informatique se composera normalement des éléments suivants: un ordinateur Gould 32/97; une imprimante par lignes; des affichages par tubes cathodiques; des unités de disque 300 MB; des unités

de bande magnétique 75 pouces/s; un lecteur de cartes 1000 cartes/min.

L'évolution est si rapide dans le domaine des ordinateurs qu'il arrive bien souvent qu'un simulateur soit livré équipé d'un ordinateur en retard d'au moins une génération. C'est pourquoi il est très important de prévoir dans la conception du simulateur la possibilité de changer de logiciel. De même, on cherche de plus en plus à utiliser tel quel le logiciel de traitement fourni par le fabricant, à programmer entièrement en langage évolué et à structurer la conception et la programmation.

Défauts de fonctionnement

On entend par là les défaillances ou la mauvaise performance de composants de la centrale, que l'on peut classer en deux catégories: les défauts génériques et les défauts spécifiques de tel ou tel système. Les défauts

Evolution de la simulation dans l'industrie nucléaire

Les deux premiers simulateurs de centrales nucléaires ont été construits en 1957, presque simultanément. Celui de la centrale magnox de Calder Hall (Royaume-Uni), destiné à la formation des opérateurs, a été terminé le premier. L'autre devait équiper le *Savannah*, navire marchand à propulsion nucléaire. Ils étaient l'un et l'autre la reproduction exacte de la salle de commande de leur installation respective. Le simulateur du *Savannah* pouvait en outre servir à des études techniques du système de propulsion du navire.

Il existe aujourd'hui divers types de simulateurs, depuis le modèle conçu pour l'enseignement des principes fondamentaux aux stagiaires sans expérience pratique, jusqu'au simulateur total plus spécialement réservé à ceux qui ont déjà plusieurs années de pratique de l'exploitation.

Les modèles pour débutants visent à enseigner les principes fondamentaux des rapports de cause à effet qui existent entre les divers systèmes d'une centrale nucléaire. Ces simulateurs conceptuels, pourrait-on dire, se sont avérés les mieux adaptés à la formation initiale des futurs opérateurs et du personnel d'appui. Il est plus facile au stagiaire inexpérimenté de se pénétrer des concepts sur lesquels repose le fonctionnement d'une centrale nucléaire lorsqu'il ne risque pas de se perdre dans la multitude de détails que lui présente la reproduction exacte d'une salle de commande. Quand il a bien appris ces notions de base et connaît l'essentiel de la conduite d'une installation, il peut passer sans hésiter aux exercices sur simulateur total.

Ce type de simulateur est la réplique fidèle de la salle de commande de la centrale considérée et reproduit si exactement les divers systèmes que l'opérateur expérimenté devrait être incapable de faire une distinction entre les conditions de fonctionnement simulées et celles de la centrale réelle. La précision de la simulation est bien définie et les paramètres critiques et leurs tolérances sont clairement spécifiés.

Entre ces deux extrêmes existe toute une série de modèles adaptés aux divers aspects de la formation des opérateurs et du personnel d'appui.

Simulateurs en service

On peut lire dans les rapports de l'AIEA que la simulation conceptuelle basée sur mini-ordinateurs et ne représentant pas tous les détails des systèmes est de plus en plus utilisée pour l'enseignement. Une douzaine de ces ensembles sont actuellement en service.

Ce sont néanmoins les grands simulateurs de centrale qui recueillent le plus de suffrages. Selon les estimations de l'AIEA, il y en aurait une centaine dans le monde, en service ou en construction, et tous destinés à l'enseignement.

En Tchécoslovaquie, le centre de formation de l'Institut de recherches sur l'énergie nucléo-électrique est doté d'un simulateur de fabrication nationale, le VVER-440. C'est le plus perfectionné que l'on puisse trouver dans les pays membres du Conseil d'assistance économique mutuelle (CAEM); il peut simuler les conditions normales d'exploitation, les anomalies prévues et les accidents.

Un des simulateurs les plus complexes du monde a été mis en service au Royaume-Uni; il équipe le centre de formation de la centrale de Hunterston-B où sont installés des réacteurs poussés refroidis par un gaz. Il est basé sur 52 micro-ordinateurs fonctionnant en parallèle et disposant d'un accès direct à une mémoire combinée de plus de 10 mégamultiplets.

En France, un simulateur à fins multiples pour les analyses fonctionnelles vient d'être mis au point; il peut représenter les opérations normales et des scénarios d'accidents compliqués. Il peut aussi servir à la conception de systèmes et à l'étude de modes d'exploitation, mais son point fort demeure la simulation des accidents. Il est en effet capable de simuler les effets d'un accident sur l'ensemble de la centrale et de proposer en même temps plusieurs procédures d'intervention.

Les simulateurs sont habituellement utilisés pour l'enseignement et pour l'étude de modes d'exploitation, mais ce sont aussi de précieux outils de recherche. La preuve en a été faite en Finlande par l'homologation d'un système perfectionné d'affichage des paramètres de sûreté en vue de son installation dans la centrale nucléaire de Loviisa.

génériques sont ceux de la plupart des composants: pompes, vannes, échangeurs de chaleur, régulateurs, etc., tandis que les défauts spécifiques comprennent les fuites des éléments combustibles, les fuites de tubes de condenseur, les ruptures de conduites, etc.

La norme américaine relative aux simulateurs servant à la formation des opérateurs de centrales nucléaires exige un minimum de 75 défauts de fonctionnement pour faire la preuve des réponses inhérentes de la centrale et du fonctionnement des dispositifs automatiques de commande. En outre, la norme prévoit que le degré de fidélité de la simulation doit permettre à l'opérateur d'intervenir pour redresser une situation ou en atténuer les conséquences et de maintenir la centrale dans des conditions acceptables d'exploitation.

Les simulateurs modernes dépassent de loin cette norme; ils sont capables, en effet, de provoquer une défaillance de presque tous les composants de la centrale, ce qui représente plusieurs centaines d'incidents. Ces défauts génériques et spécifiques et la possibilité qu'a

l'opérateur de provoquer la défaillance de n'importe quel matériel de la salle de commande aboutissent ensemble à une multitude de scénarios de mauvais fonctionnement.

La collaboration s'impose

On peut dire, pour conclure, que la réalisation d'un simulateur total de centrale nucléaire est aujourd'hui, et au sens propre du terme, une entreprise commune du fabricant et de son client. Depuis le rassemblement initial des données jusqu'à la phase finale où l'on procède aux essais de vérification, une étroite collaboration et un solide esprit d'équipe doivent s'instaurer, car la tâche devient de plus en plus complexe et la qualité du produit fini dépend dans une très large mesure de cette coopération.

Il ne faut pas perdre de vue la véritable raison d'être d'un simulateur et la nécessité d'optimiser l'emploi des moyens de formation, simulateurs partiels ou simulateur total, si l'on veut disposer d'un programme de formation rationnel et cohérent.

