

# Les facteurs humains dans l'exploitation des centrales nucléaires

## *Améliorer l'interface homme/machine*

par E. Swaton, V. Neboyan et L. Lederman

L'erreur humaine peut jouer un grand rôle dans la défaillance des grands systèmes interactifs marqués par la complexité. Dans les centrales nucléaires, l'expérience montre qu'une part considérable des incidents est imputable à l'erreur humaine. Cependant, cette même expérience montre que l'intervention humaine peut être très efficace à condition que les intéressés connaissent parfaitement la situation de la centrale. La qualité de l'interface homme/machine est donc importante, non seulement pour prévenir les erreurs, mais aussi pour aider l'exploitant à faire face à l'imprévu.

La fiabilité de l'être humain peut s'entendre de manière aussi bien qualitative que quantitative. Sur le plan qualitatif, il s'agit d'assurer le déroulement harmonieux d'activités nécessaires à la fiabilité et à la disponibilité du système. Sur le plan quantitatif, il s'agit de disposer de données sur la fréquence des défaillances ou les probabilités d'erreurs qui puissent servir, par exemple, aux évaluations probabilistes de la sûreté.

### **Enseignement et formation**

Pour assurer l'exploitation sûre et fiable d'une centrale nucléaire, il faut avant tout du personnel qualifié. La formation continue est indispensable pour acquérir les compétences voulues et maintenir le niveau des connaissances; elle comporte la formation initiale, le recyclage et le perfectionnement. Chaque pays élabore son propre système éducatif en fonction de ses besoins propres, mais les compétences spécifiques requises du personnel des centrales nucléaires sont universelles, car on ne peut transiger avec la sûreté et la fiabilité d'une centrale nucléaire. Il convient donc que les programmes de formation nucléaire de tous les pays soient de même niveau.

Une importante qualité, surtout pour l'avenir, sera donc la faculté d'adaptation, afin de pouvoir faire face à l'imprévu. Il s'agit de repérer, de reconnaître et de formuler un problème, puis de décider s'il faut le résoudre ou non, et de quelle manière.

Tandis que l'enseignement implique le plus souvent une scolarité régulière, la formation est plutôt orientée vers une tâche précise. C'est pour cette raison qu'en plus de la formation en salle de classe ou en cours d'emploi le recours aux simulateurs retient beaucoup l'attention. Dans la plupart des pays où il existe des centrales nucléaires, il existe aussi des programmes de formation

par simulation qui sont généralement très au point. Mais la valeur de ce type de formation peut être limitée par l'ancienneté, le type, la dimension et la capacité du simulateur. Cela dit, la formation et le recyclage par simulateur sont indispensables pour améliorer la sûreté d'exploitation des centrales et inculquer les connaissances indispensables à la gestion d'une centrale dans les conditions normales ou anormales. Qui plus est, les avantages de ce genre de formation sont doubles: tout d'abord, les résultats des évaluations probabilistes de la sûreté permettent de construire des scénarios pour la formation et, inversement, la simulation permet de mettre à jour et d'améliorer ces évaluations; ensuite, la simulation permet d'évaluer les modifications apportées à une centrale du point de vue des facteurs humains. Il peut s'agir de nouveaux matériels, de l'adéquation des modalités d'exploitation dans les conditions normales ou en cas d'urgence et de la mise à jour ou de l'adaptation des programmes de formation.

### **La formation par simulateur**

Utilisés depuis de nombreuses années pour la formation du personnel de centrales nucléaires, les simulateurs sont devenus des appareils très compliqués. On peut désormais traiter des scénarios de formation qui étaient impensables il y a encore cinq ans, et que ne ferons-nous dans cinq ans! Certains spécialistes estiment qu'il nous faut une plus grande puissance informatique pour assurer une formation plus poussée, mais la plupart pensent que la capacité dont nous disposons actuellement est suffisante pour ce que nous avons à faire. En même temps, la tendance est actuellement à l'usage de modèles plus fidèles. Depuis cinq ans, on cherche à obtenir une haute fidélité de simulation pour les modèles de cœurs de systèmes de refroidissement des réacteurs. Il convient de s'interroger sur l'opportunité d'une telle évolution. C'est une chose d'assurer une plus grande fidélité, mais c'en est une autre, plus importante encore, d'en déterminer le besoin dans la mesure où les modèles existants ne peuvent répondre aux objectifs de la formation. Récemment, une réunion de spécialistes de l'AIEA sur la formation par simulateur du personnel des centrales nucléaires a montré que certains constructeurs ont étudié les besoins de la formation qui justifiaient une adaptation des modèles. C'est là un bon signe. En effet, la conception des simulateurs d'enseignement doit se faire en fonction des objectifs assignés à la formation. Or, cela n'a pas toujours été le cas.

Mme Swaton, M. Neboyan et M. Lederman travaillent au Département de l'énergie et de la sûreté nucléaires.

Un simulateur complet est un outil très puissant, mais étant donné sa complexité — et son coût — il n'y a pas toujours lieu d'y recourir. On a estimé qu'environ 75 à 80% des besoins de formation pouvaient être assurés par une représentation de seulement 25 à 30% de l'ensemble de la salle de commande.

Pour la formation axée plutôt sur la compréhension d'une certaine partie d'une centrale nucléaire ou d'une certaine fonction, on utilise des simulateurs partiels. Il s'agit d'un analyseur de centrale, d'un système de microsimulation ou d'un simulateur de «fonction». Il faut alors établir un «modèle mental» du système qui permet de penser l'opération à effectuer, en se concentrant sur la capacité de traiter et d'utiliser une information spatiale. Un bon exemple en est la simulation à demi-échelle d'un système de refroidissement des réacteurs à eau sous pression, dite «modèle de verre». Même si les pressions utilisées ne sont pas prototypiques, il est très important, sur le plan de la formation, de pouvoir visualiser directement la thermodynamique.

En ce qui concerne l'évolution des simulateurs, un autre problème a été signalé: le processus même du cerveau; en d'autres termes, comment apprend-on et comment peut-on appréhender le problème de l'interface homme/machine en connaissant mieux les capacités cognitives humaines, de façon à réduire la surcharge de l'opérateur et améliorer sa performance?

Si l'on passe en revue la formation par simulation appliquée aux situations d'urgence, on s'aperçoit que, dans la réalité, les incidents ou accidents auxquels sont confrontés les opérateurs évoluent souvent de manière bien différente des scénarios présentés sur simulateur. En outre, comme ces situations d'urgence sont rares par définition, il est assez difficile de prévoir et d'analyser le comportement humain en pareils cas. Cela dit, on s'accorde généralement à reconnaître l'utilité et l'importance de ce type de formation, surtout si les scénarios d'accidents sont conçus de manière à amorcer des séquences à des niveaux de puissance variables et si la simulation peut continuer jusqu'à la dégradation du cœur du réacteur. Par ailleurs, si le stagiaire fait une erreur de manipulation, on peut arrêter la simulation et analyser l'erreur. Ensuite, le scénario reprend, constituant ainsi un enseignement utile à la fois pour le formateur et le stagiaire. On peut recueillir des données systématiques au moyen d'un suivi automatique des prestations du stagiaire ou mettre en place un mécanisme qui transmet directement les erreurs au formateur. Les évaluations probabilistes de la sûreté utilisent de plus en plus les données recueillies à l'occasion des séances de simulateur.

### Collecte de données sur les erreurs humaines

L'analyse des événements anormaux et des évaluations probabilistes de la sûreté montre qu'une part importante de ces incidents est due à une erreur humaine. La principale source d'information sur le comportement humain et ses erreurs est l'expérience d'exploitation des centrales. En plus de la notification des incidents aux autorités réglementaires de chaque pays, il existe plusieurs systèmes internationaux de notification. Le Système de notification des incidents de l'Agence pour l'énergie nucléaire de l'Organisation de

coopération et de développement économiques (AEN/OCDE) recueille des exemples typiques d'incidents en Europe de l'Ouest, au Canada, au Japon et aux Etats-Unis. Le Système de notification des incidents de l'AIEA fonctionne essentiellement de la même manière, mais tient également compte des rapports en provenance de l'Europe de l'Est et des pays en développement. Un autre système, celui du centre commun de recherche d'ISPRA, regroupe les informations provenant de certains systèmes nationaux. Cela dit, ces systèmes de notification ne relèvent pas particulièrement les erreurs humaines; il faudrait donc mettre au point des méthodes d'analyse permettant de dégager la part du facteur humain dans un accident. Seules quelques rares sociétés ont commencé à le faire.

Voici quelques constatations:

- Les essais et les opérations d'entretien sont assez souvent l'occasion d'erreurs. Leur automatisation pourrait résoudre certains problèmes.
- Les erreurs humaines sont plus fréquentes dans les systèmes peu utilisés comportant peu d'éléments redondants, ou insuffisamment automatisés.
- Les erreurs humaines dans les conditions anormales sont plus fréquentes juste après une alarme.
- Les défauts de conception (qu'il s'agisse des systèmes, de l'aménagement de la salle de commande ou de l'ergonomie) sont une des principales causes d'erreurs humaines.
- Le passage des consignes au moment des changements d'équipes est souvent une source d'erreurs.

Les évaluations probabilistes de la sûreté donnent de précieuses indications pour déterminer les systèmes sujets à des interactions humaines et regrouper ces interactions en fonction de tâches communes ou de causes communes. Néanmoins, l'absence de données précises sur le comportement humain, notamment dans les situations exceptionnelles, impose des limites. A ce titre, on ne devrait voir dans les évaluations probabilistes de la sûreté qu'une indication d'un problème éventuel d'origine humaine et non une prévision de comportement.

### La rétro-information

L'analyse des accidents permet de comprendre les erreurs humaines jusqu'à un certain point. L'opérateur doit recevoir une rétro-information, mais le problème est de savoir comment la filtrer.

Pour résoudre les problèmes dus à l'erreur humaine ou déduits de l'expérience d'exploitation, certains pays s'en remettent aux bases de données, d'autres aux simulateurs. Plusieurs questions se posent alors: comment collecter l'expérience des opérateurs et comment évaluer les divers avantages de telle ou telle solution? Les concepteurs devraient-ils partir d'une stratégie plus rigoureuse? Il convient de poursuivre les recherches dans ce domaine, et ce dans plusieurs directions, et une certaine coordination semblerait s'imposer; les experts sont nombreux à le penser\*.

\* C'est du moins l'opinion générale émise par des spécialistes lors de la réunion qui s'est tenue à Roskilde, Danemark, en mai 1987 sur «La rétro-information sur le facteur humain dans les centrales nucléaires: implications de l'expérience d'exploitation pour l'analyse, la conception et le fonctionnement des systèmes».

De nombreux centres de recherche se penchent sur le rôle du facteur humain dans les incidents marquants. La Commission de la réglementation nucléaire des Etats-Unis a mis au point un programme officiel d'analyse des incidents. Il s'agit notamment de faire en sorte que les incidents de fonctionnement fassent l'objet d'une analyse technique systématique. Tout arrêt d'urgence doit être notifié à la Commission et le programme est chargé de rendre fidèlement compte des incidents.

Au Japon, tout incident doit faire l'objet d'un rapport initial dans les 48 heures, destiné à une banque de données, et d'un rapport complet dans les 30 jours. La proportion d'incidents dus à une erreur humaine est d'environ 10%. Dans plus de la moitié des cas (54%), il y a eu arrêt automatique; 15% des cas ont provoqué une réduction de puissance et 31% n'ont eu aucune conséquence. Environ la moitié (51%) des erreurs humaines étaient dues à un entretien déficient, et 29% à un fonctionnement défectueux.

Selon l'estimation d'un expert belge, sur 40 arrêts d'urgence de sept réacteurs, 70% étaient dus au facteur humain. Une analyse statistique approfondie réalisée par l'Electricité de France (EDF) fait état d'erreurs relativement peu nombreuses la nuit, lorsque l'activité est réduite, et à l'heure du déjeuner. Les erreurs les plus fréquentes sont des oublis ou des retards. En ce qui concerne la nature même de l'erreur, il s'agit le plus souvent de quelqu'un qui oublie une opération ou prend une mauvaise initiative, ou fait un diagnostic erroné de l'état du système.

La simulation permet également d'obtenir une information intéressante sur le comportement des opérateurs, mais les recherches à faire dans ce domaine exigent beaucoup d'argent et d'efforts. En France, par exemple, on a construit un simulateur complet d'une salle de commande informatisée pour extraire rapidement l'information du comportement des opérateurs.

### Les auxiliaires de l'opérateur

Il s'agit d'une catégorie de dispositifs destinés à la salle de commande d'une centrale nucléaire en vue d'aider l'opérateur dans son travail et de réduire ainsi la probabilité d'erreurs humaines. Il y en a de très simples — par exemple, le codage en couleurs des affichages pour les distinguer les uns des autres — et de très complexes — tel le système vidéo informatisé qui regroupe en un affichage central placé juste devant l'opérateur les indications dispersées dans toute la salle de commande. De gros efforts ont été faits pour informatiser le renseignement et les systèmes auxiliaires afin d'aider les opérateurs.

Différents systèmes ont été mis au point, en fonction d'un objectif prédéfini. Alors que les premiers systèmes visaient essentiellement à surveiller des fonctions critiques de sûreté et à détecter et localiser les perturbations, ceux de la deuxième génération ajoutaient à cette mission limitée une information sur l'état normal de la centrale en fonction du mode d'exploitation ainsi que des prévisions de comportement.

Il convient de s'interroger sur la place croissante des systèmes auxiliaires informatisés en fonction des

différentes tâches à remplir, et de mettre en évidence les forces relatives de l'homme et de l'ordinateur.

*Identification.* Si les ordinateurs sont doués pour reconnaître des structures prédéfinies, l'être humain, lui, est bien supérieur quand il s'agit de reconnaître une structure évolutive. En outre, l'homme est capable d'agir même lorsqu'il dispose d'une information incomplète. La force de l'ordinateur, c'est de pouvoir relever et valider des mesures et d'opérer des calculs très compliqués. Pour identifier, l'ordinateur procède par déduction à partir de règles qui lui sont données.

*Analyse et interprétation.* L'ordinateur peut effectuer assez rapidement, et de manière fiable, des opérations algorithmiques complexes, mais sa faculté heuristique est limitée. Au contraire, l'homme peut généraliser, faisant appel à son jugement, à son expérience et à ses connaissances implicites.

*Comparaisons.* L'ordinateur est manifestement très doué pour traiter et mobiliser de vastes quantités de données précises et les comparer selon des règles prédéfinies. L'homme, par contre, sait utiliser des données provenant de diverses sources et de formats différents pour procéder à des comparaisons, faisant plus appel à son expérience qu'à des déductions précises.

*Planification.* Pour trouver la solution optimale d'un problème parfaitement défini, l'ordinateur est maître. Mais, si le problème est légèrement modifié, c'est l'homme qui l'emporte, car il peut adapter rapidement les procédures existantes à la situation et même imaginer de nouvelles procédures si besoin est.

De manière générale, l'efficacité et la fiabilité de l'ordinateur exigent que les problèmes, données, règles ou procédures soient très bien définis. Quant à l'opérateur humain, il peut travailler dans ces mêmes conditions mais peut également affronter des problèmes mal définis, avec des données imparfaites et des règles incomplètes. Ainsi, l'homme demeure capable de contrôler un système dans des situations où l'ordinateur est voué à l'échec. Le fait que l'ordinateur effectue certaines tâches mieux que l'homme n'est pas une raison pour éliminer celui-ci.

### Les évaluations probabilistes de la sûreté et les décisions en matière de sûreté

Depuis une quinzaine d'années, les évaluations probabilistes de la sûreté des réacteurs sont devenues un outil d'importance primordiale. Plus d'une trentaine ont été effectuées et les résultats se sont avérés inestimables pour la conception et l'exploitation des centrales. Malgré tout le potentiel de ces études, on les utilise encore fort peu pour la prise de décisions, d'une part parce qu'elles comportent, outre des données fort utiles, une abondante information technique qui n'intéresse pas les décideurs et, d'autre part, on ne peut vraiment les comprendre qu'en connaissant bien la méthodologie.

Il y a quelques années, on a cherché à utiliser de façon plus immédiate et plus interactive l'information provenant de ces évaluations probabilistes en créant un «modèle vivant» d'évaluation directement utilisable aux fins de la sûreté des opérations.

Pendant ce temps, les petits ordinateurs, et notamment les ordinateurs personnels, ont explosé sur le marché. Fonctionnant haut le pied ou connectés à des ordinateurs plus conséquents, ils sont désormais utilisés dans de nombreux secteurs industriels.

De même, les systèmes intégrés actuellement mis au point pour traiter l'information des évaluations probabilistes de la sûreté utilisent beaucoup les nouveautés de la technologie des petits ordinateurs. Etant donné leur grande facilité d'utilisation et leurs possibilités d'interaction, ces systèmes sont tout particulièrement armés pour mettre à jour cette information et répondre aux questions du genre «Que se passerait-il si...?».

L'application des renseignements provenant de ces évaluations à la gestion de la sûreté se fonde sur les conséquences éventuelles pour la sûreté générale de la centrale de tous changements de configuration de cette dernière: par exemple, contrôle et évaluation de l'état des systèmes essentiels à la sûreté, modification du mode d'exploitation, révision des spécifications techniques (notamment celles relatives à la durée des tests, de la maintenance et des arrêts), liste des réparations prioritaires, évaluation des modifications de conception compte tenu de l'interaction entre les différents systèmes, liste des inspections prioritaires.

On s'efforce actuellement de fournir aux décideurs l'information correspondant aux conditions normales d'exploitation d'une centrale. Les logiciels disponibles comportent un modèle de centrale fondé sur l'analyse des arbres de défaillance et des séquences d'événements. Ces logiciels sont surtout utilisés par le personnel d'exploitation des centrales et les organismes réglementaires.

Voici deux exemples de systèmes récemment mis au point:

*PRISIM (Probabilistic Safety Information Management System)* — Système de gestion de l'information probabiliste sur la sûreté, comportant un logiciel pour ordinateur personnel qui permet un accès rapide à l'information fournie par les évaluations probabilistes de la sûreté. La base de données contient à la fois de l'information prétraitée extraite des données de référence des évaluations probabilistes et un modèle de sûreté de la centrale qui permet de relever les changements intervenus dans la sûreté consécutifs à une modification des conditions d'exploitation. Les questions de sûreté entraînant une modification de la configuration de la centrale peuvent être traitées par un modèle qui permet à l'utilisateur de spécifier (à partir d'un schéma ou de listes de composants) le nouvel état de la centrale et de recalculer la marge de sécurité. Diverses mesures sont introduites pour classer les systèmes de sûreté et les démarches des opérateurs. Le code permet également d'étudier la réaction des systèmes de sûreté à telle ou telle défaillance. On peut ainsi déceler les faiblesses de conception, telle la sensibilité aux défaillances des systèmes d'appui. L'information prétraitée comprend la description des séquences les plus importantes d'un

accident, l'intervention de l'opérateur, l'interface entre les systèmes d'appui, un répertoire complet des caractéristiques techniques, et une liste de priorités pour les systèmes, sous-systèmes, composants et interventions de l'opérateur intéressant la sûreté. PRISIM a été conçu pour la Commission de la réglementation nucléaire des Etats-Unis afin d'aider les inspecteurs. Il fonctionne actuellement dans trois centrales nucléaires: Arkansas Nuclear-1, Peach Bottom-2 et Surry-1.

*ESSM (Essential Systems Status Monitor)* — Suivi de l'état des systèmes fondamentaux. C'est un logiciel fondé sur les techniques de l'analyse des arbres de défaillance, auquel les opérateurs ont accès en continu. Ils peuvent ainsi procéder très rapidement à certaines évaluations probabilistes des systèmes dans un contexte interactif. Des claviers et des écrans de la salle de commande centrale permettent de visualiser la configuration du moment des divers éléments de la centrale. Les opérateurs peuvent interroger ESSM en permanence sur la disponibilité globale des systèmes essentiels. ESSM peut analyser les arbres complexes de défaillances (qui modélisent les redondances et les interactions complexes des systèmes), compte tenu des conséquences des arrêts et des configurations du moment. Le système affiche ensuite la disponibilité des différents systèmes essentiels, déterminée à partir de critères probabilistes. En même temps, ESSM surveille l'application des règles d'exploitation déterministes; s'il y a faute et qu'une intervention s'impose, toute l'information pertinente est affichée. En outre, ESSM peut recommander à l'opérateur de procéder à une maintenance d'urgence et planifier pour lui les opérations nécessaires. La centrale Heysham-II, au Royaume-Uni, a récemment été équipée d'un système ESSM.

### Coopération internationale

Il existe de nombreuses possibilités de renforcer le facteur humain dans l'exploitation d'une centrale nucléaire. On peut recourir à l'ingénierie pour améliorer le matériel ou corriger le comportement de l'exploitant. Cependant, les mesures à prendre et les priorités à fixer ne semblent pas faire l'unanimité. C'est une des raisons pour lesquelles l'AIEA a organisé une conférence internationale sur l'interface homme/machine dans l'industrie nucléaire (commande et instrumentation, robotique et intelligence artificielle)\*, qui s'est tenue à Tokyo du 15 au 19 février 1988. Accueillie par le Gouvernement du Japon, cette conférence était organisée en coopération avec l'AEN/OCDE et la Commission des communautés européennes (CCE). Au nombre des thèmes traités figuraient l'analyse du comportement humain dans l'exploitation d'une centrale, les perfectionnements techniques visant à améliorer la performance de l'homme, et l'amélioration quantitative et qualitative de l'information fournie aux opérateurs.

\* Les actes de cette conférence seront publiés par l'AIEA.

