

# PRISE EN COMPTE DES RISQUES FACTEURS HUMAINS DANS LES CHOIX DE CONCEPTION

## CONSIDERING THE HUMAN FACTORS CONTRIBUTION TO THE RISK IN THE DESIGN CHOICES

Bernard PAPIN  
Commissariat à l'Energie Atomique  
CEA CADARACHE  
F 13108 St Paul Lez Durance CEDEX

### Résumé:

Du fait de l'augmentation de la fiabilité des technologies modernes, la contribution de l'homme au risque lié à l'exploitation des installations industrielles devient de plus en plus significative : dans le cas des réacteurs nucléaires, les évaluations probabilistes de sûreté récentes ont montré que cette contribution pouvait atteindre 25% du risque total de conséquences inacceptables, toutes situations confondues. Ceci doit inciter les concepteurs des futures installations à essayer de minimiser cette contribution des facteurs humains (FH), et ceci dès les phases précoces de la conception : le retour d'expérience montre en effet que c'est lors de ces phases précoces que les options fondamentales de conception susceptibles d'impacter le plus la performance humaine en exploitation, sont définies.

Le problème est que, durant ces phases précoces de la conception, il est aussi presque impossible d'appliquer des méthodes formelles d'évaluation de la fiabilité humaine pour orienter cette optimisation sous l'angle des FH, du fait que les conditions précises d'exploitation de l'installation, nécessaires pour cette analyse de fiabilité humaine, ne sont pas suffisamment connues.

Dans ce papier, une approche alternative de l'évaluation de la fiabilité humaine en exploitation, utilisable pour orienter les choix de conception, est proposée : elle est basée sur l'évaluation de la complexité fonctionnelle et opérationnelle de l'installation. A titre d'exemple, cette approche est utilisée pour comparer divers concepts de réacteurs nucléaires, du point de vue des facteurs humains.

### Abstract :

With the increasing reliability of the modern technological systems, the human contribution to the global risk in the operation of industrial systems is becoming more and more significant : in the nuclear reactor operation for example, a recent PSA estimation of this contribution is about 25% of the risk of core melting, all situations considered. This urges the designers of future plants to consider the minimisation of this Human Factor (HF) contribution, at the very early stage of their design : the experience feedback shows that this is indeed at this stage that the fundamental design options, impacting the most the human reliability in operation, are fixed.

The problem is that at these early design stages, it is also quite impossible to apply formal human reliability methods to support this HF optimisation, while the precise operating conditions of the plant are not yet known in enough details.

In this paper, another approach of the HF evaluation during the design, based on the functional and operational complexity assessment, is proposed. As an illustration, this approach is used to compare various concepts of nuclear reactors from the point of view of the Human Factor relevance.

### L'impact de l'homme dans la sûreté en exploitation

La plupart des analyses menées pour évaluer les risques liés à l'exploitation d'installations "sensibles" du point de vue de la sûreté et de la sécurité, font apparaître que celui-ci comporte deux composantes principales (figure 1) :

- la première composante est liée aux défaillances matérielles, susceptibles de conduire à des situations de fonctionnement dégradées ou dangereuses,
- la seconde composante est liée aux défaillances humaines, soit dans le cadre des opérations de conduite (auquel cas l'impact sur les situations dégradées est direct), soit au cours d'opérations de maintenance (impact indirect, via la défaillance induite des matériels importants pour la sûreté ou la sécurité).

Il est évident que la première composante du risque dépend directement des options techniques de conception, et cette minimisation des défaillances matérielles figure donc naturellement au premier rang des préoccupations des concepteurs.

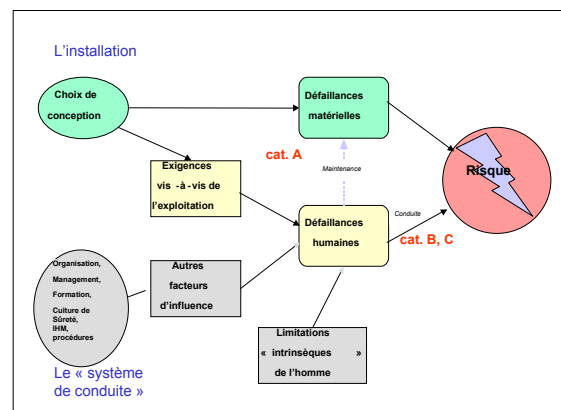


Figure 1 : la fiabilité humaine et le risque

Par contre, ces concepteurs sont rarement conscients du fait que leurs choix de conception, même au niveau des processus de base de l'installation, sont aussi susceptibles d'impacter la performance humaine en exploitation. Si on analyse plus en détail les mécanismes à l'origine des

défaillances humaines, on constate en effet qu'au delà de ce que l'on peut appeler la défiabilité intrinsèque de l'homme ("l'erreur est humaine"), il existe de nombreux *facteurs d'influence* externes<sup>1</sup>, liés au contexte d'intervention de l'homme dans l'exploitation, qui sont susceptibles d'influer sur sa performance :

- certains de ces facteurs sont "classiquement" liés à des aspects organisationnels et environnementaux (niveau de compétence, organisation des équipes, moyens d'aide disponibles pour la conduite, interfaces homme-machine, etc.) qui pourront être optimisés une fois que l'installation elle-même sera définie en détail, lors de la conception des moyens de conduite.
- une autre catégorie de facteurs est, par contre, directement liée aux choix de conception "profonds" de l'installation elle-même : ils résultent des contraintes imposées aux équipes d'exploitation par le fonctionnement des ces installations. Ces contraintes déterminent la complexité des situations que les opérateurs auront à gérer, ainsi que la pression temporelle à laquelle ils seront soumis. Ces choix de conception "profonds" déterminent aussi les conditions d'ambiance (températures, bruit, accessibilité...) qui conditionnent fortement les performances des équipes de maintenance.

## La complexité opérationnelle comme critère de conception

### Une prise en compte précoce des FH

On constate donc que, contrairement à certaines idées reçues, on ne doit pas commencer à se préoccuper des facteurs humains uniquement lors de la définition des interfaces homme/machine (conception "ergonomique" des postes de conduite), ou des fonctions de contrôle/commande (choix d'automatisation).

La prise en compte du facteur humain doit commencer beaucoup plus tôt, de manière à essayer de minimiser les contraintes induites sur les équipes d'exploitation par les choix de conception de l'installation elle-même, c'est-à-dire :

- au niveau de la définition des processus physiques fondamentaux mis en œuvre dans l'installation,
- au niveau de la conception des principaux systèmes techniques permettant d'assurer la sûreté et la sécurité de l'installation.

Ce qui est proposé ici s'apparente donc à une démarche *préventive* (minimiser "à la source" les contraintes imposées aux équipes d'exploitation), par opposition<sup>2</sup> à la démarche purement *palliative* (aider les équipes à gérer ces contraintes par optimisation des moyens de conduite) utilisée généralement.

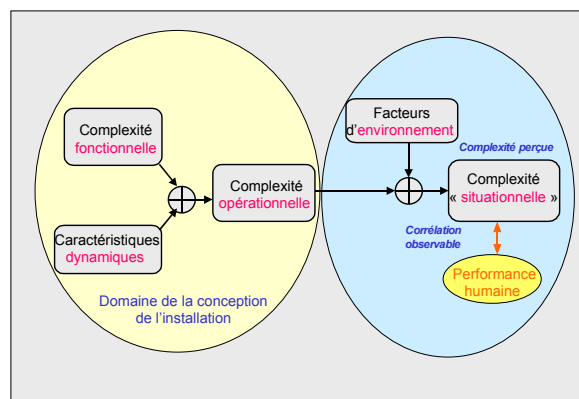
Le problème que l'on doit néanmoins résoudre pour appliquer une telle démarche d'intégration "préventive" des

exigences FH dans la conception des installations, est de disposer de *critères* concrets et suffisamment synthétiques permettant d'orienter cette démarche d'optimisation, ou de caractériser l'impact de certaines modifications du design sur la performance humaine attendue.

- La première solution envisagée (et d'ailleurs préconisée par les autorités régulatrices, dans le cas de la conception des futures installations nucléaires) est de s'appuyer sur des méthodes formelles d'évaluation des risques, telles que l'évaluation probabiliste de sûreté (EPS), et plus précisément dans le cas des facteurs humains, l'évaluation probabiliste de fiabilité humaine (EPFH). La limite de ce type d'approche est qu'elle est fondée sur une analyse détaillée de scénarios de fonctionnement (arbres d'événements, etc.). Cette analyse n'est donc possible que lorsque la conception de l'installation est suffisamment avancée pour pouvoir connaître les différentes séquences d'événement susceptibles de se développer. Les études de fiabilité humaine requièrent également une description précise des *situations de travail*, ce qui est difficilement envisageable en début de conception<sup>3</sup>
- L'autre solution que nous proposons est de fonder la démarche d'optimisation des FH à la conception sur des critères plus "macroscopiques", susceptibles d'être évalués dès que les options de base de conception de l'installation sont connues : ces critères de *complexité fonctionnelle et opérationnelle* définissent directement les contraintes pesant sur les équipes d'exploitation, indépendamment des aspects "environnementaux" liés à la conception du système de conduite.

### Les déterminants de la complexité et les contraintes qui en découlent

La figure 2 résume les différents concepts de complexité qui interviennent dans notre approche d'analyse des facteurs humains en conception :



**Figure 2** : les différents concepts de complexité et leur lien avec la fiabilité humaine

<sup>1</sup> Par exemple, dans les études d'évaluation probabiliste de risques FH, on utilise la notion de "Performance Shaping Factors" (PSF's) pour caractériser ces influences externes.

<sup>2</sup> Plutôt que d'opposition, on devrait plutôt parler de complémentarité, car, naturellement, l'optimisation au niveau du design de l'installation ne dispense pas de concevoir aussi des moyens de conduite efficaces.

<sup>3</sup> Naturellement, cette restriction s'applique surtout à la conception d'installations totalement nouvelles et innovantes : dans le cas de conceptions procédant par des évolutions limitées à partir d'un existant, il est toujours possible de procéder en différentiel par rapport à l'analyse des installations existantes.

Le seul aspect de la complexité qui est directement corrélé à la performance humaine<sup>4</sup> est ce que l'on peut appeler la complexité "situationnelle", c'est à dire la perception directe (et subjective...) de la complexité des situations par les opérateurs. Cette complexité "globale" est aussi celle qui est prise en compte dans les études d'évaluation probabiliste, et elle fait intervenir des éléments liés :

- aux opérateurs eux-mêmes (ex: niveau d'expertise, "vécu des opérateurs", etc.),
- aux conditions environnementales de l'activité (qualité des IHM et des aides, organisation du travail, etc.),
- aux exigences intrinsèques de l'activité liées au fonctionnement de l'installation.

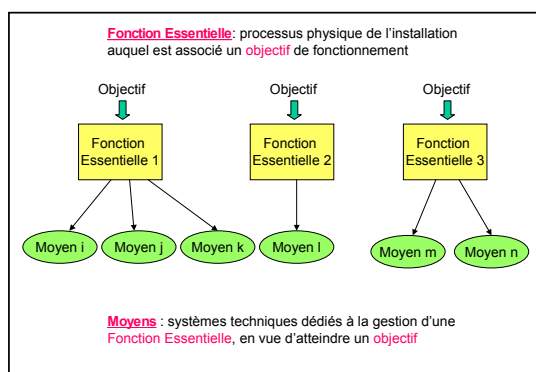
L'optimisation des deux premiers éléments intervient lors de la conception (en phase avancée du projet...) du *système de conduite* de l'installation.

Notre objectif de minimisation du "risque FH" au stade précoce de la conception concerne essentiellement le troisième élément, que nous avons qualifié de "complexité opérationnelle". Cette complexité opérationnelle résulte elle-même de la superposition de contraintes liées à l'architecture fonctionnelle de l'installation (complexité fonctionnelle) et d'éléments liés à son comportement dynamique (ex : temps de réponse, délais de grâce, etc.).

### Principes d'analyse de la complexité opérationnelle

La méthode préconisée pour l'analyse de la complexité opérationnelle s'appuie sur l'architecture fonctionnelle de l'installation, c'est à dire sur les principaux processus physiques mis en jeu et sur les moyens techniques conçus pour contrôler ces processus physiques, de manière à atteindre les *objectifs d'exploitation* (sûreté, productivité, sécurité, etc.).

La représentation générique utilisée est donc basée sur la notion de *fonctions essentielles* de l'installation, qui associent les *objectifs* assignés au fonctionnement de ces différents processus physiques (exemple : maintien des "grands équilibres" physiques en termes de bilans de masse ou d'énergie) et les *moyens* techniques mis en œuvre pour contrôler ces grands équilibres (ex: moyens de production ou d'évacuation d'énergie, d'injection ou d'évacuation de fluides, etc.) comme illustré sur la figure 3.



**Figure 3** : Les fonctions essentielles de l'installation et la représentation objectifs-moyens

<sup>4</sup>Voir par exemple les études réalisées sur ce thème au laboratoire facteurs humains du centre d'étude de HALDEN [ 2 ]

La complexité d'une architecture fonctionnelle de ce type résulte de deux types de caractéristiques :

- les caractéristiques de *complexité individuelle* des diverses entités constituant cette architecture, comme par exemple la complexité des processus physiques mis en jeu (comportement dynamique, linéarité, etc.), et la complexité des systèmes techniques utilisés (complexité structurelle et/ou fonctionnelle),
- les caractéristiques liées *aux interactions entre ces entités*, comme par exemple les interactions entre les divers processus physiques mis en jeu, les effets indirects de l'utilisation de certains moyens sur d'autres processus que ceux auxquels ils sont dédiés, les contraintes physiques conditionnant indirectement l'utilisation de certains moyens techniques.

On notera que cette caractérisation de la complexité n'est pas spécifique à ce type d'analyse mais qu'elle découle d'une vision beaucoup plus générale de la complexité des processus telle qu'on peut la trouver, par exemple, dans les études d'informatique théorique [1].

### Application à la conception des réacteurs nucléaires avancés

#### Les enjeux : une conception "centrée sur l'homme"

Les principes généraux énoncés précédemment pour définir la complexité fonctionnelle et le constat que cette complexité fonctionnelle impacte directement la fiabilité humaine sont susceptibles d'être appliqués à tout type d'installation à risque (a minima tout type de processus industriel continu mettant en jeu des phénomènes énergétiques, chimiques ou thermo-hydrauliques).

Dans le cas de l'industrie nucléaire, nous envisageons de proposer cette approche afin d'intégrer les exigences liées aux facteurs humains dans la conception des réacteurs futurs, et d'éviter en cela de baser le choix des grandes options de ces réacteurs sur une démarche exclusivement "techno-centrée" : la communauté nucléaire internationale étant engagée dans un large processus visant à identifier les concepts de réacteurs les plus aptes à remplir les besoins énergétiques des générations futures, il semble important que des critères liés aux facteurs humains puissent être pris en compte le plus tôt possible dans les études d'optimisation de ces réacteurs avancés.

Par ailleurs, s'agissant de concepts souvent innovants, cette analyse des aspects facteurs humains ne peut guère s'appuyer sur les résultats d'évaluations probabiliste (EPS-FH) des réacteurs de génération antérieure, ce qui justifie aussi l'emploi d'une telle méthode "alternative".

#### Mise en œuvre de l'analyse de la complexité opérationnelle dans le cas du nucléaire

Dans le cas des installations nucléaires, un des éléments déterminants orientant la conception est le besoin de minimiser l'impact de ces installation sur l'environnement<sup>5</sup> :

- cette minimisation passe par la satisfaction d'un certain nombre *d'objectifs de sûreté*, parmi lesquels les plus importants sont le maintien de l'intégrité des différentes barrières de

<sup>5</sup> Naturellement, la minimisation des nuisances n'est pas le seul objectif pris en compte, car la mission de ces installations est avant tout de produire de l'énergie de façon rentable.

confinement des produits radioactifs et le refroidissement à long terme du cœur nucléaire,

- le maintien des objectifs de sûreté s'appuie sur l'utilisation de *moyens dédiés* (les systèmes de sûreté) dont le principe de fonctionnement doit être défini très tôt dans la conception, car ils conditionnent le dimensionnement des grands composants de l'installation (cuve principale, enceinte, etc.).

L'architecture fonctionnelle des moyens associés à la sûreté de l'installation est donc définie assez tôt dans le déroulement du projet, ce qui permet de mener une analyse de sa complexité opérationnelle, et au delà d'évaluer (au moins de manière comparative entre plusieurs options de conception) l'impact possible sur la fiabilité humaine, lors de la conduite ou de la maintenance de ces moyens.

La figure 4, ci-après donne un exemple d'analyse de l'architecture fonctionnelle des moyens de sûreté dans le cas d'un projet de réacteur de nouvelle génération de la filière à eau pressurisée (European Pressurized Reactor) :

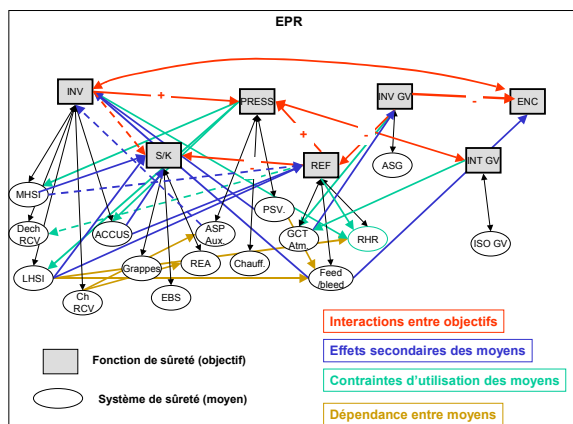


Figure 4 : analyse de la complexité fonctionnelle d'un projet de réacteur de nouvelle génération (EPR)

Cette figure montre que dans le cas d'installations de ce type, les éléments de complexité liés aux *interactions* entre objectifs et moyens de sûreté (exemple : effets secondaires, dépendances fonctionnelles, etc.) sont relativement nombreux.

Ce point est d'autant plus important que l'expérience montre que ces interactions ont un impact direct sur la complexité des modes opératoires à mettre en œuvre pour la gestion des situations dégradées de l'installation.

Ainsi (figure 5), on peut constater un certain isomorphisme entre l'architecture fonctionnelle des systèmes de sûreté, telle qu'illustrée sur la figure 4, et la structure des modes opératoires associés.

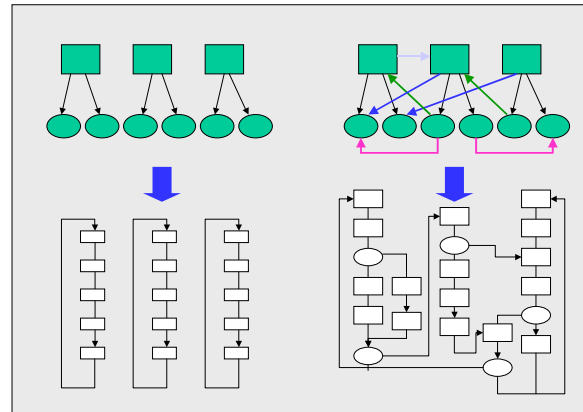


Figure 5: complexité fonctionnelle et complexité des modes opératoires

Alors que, dans le cas d'une architecture très "découplée", le maintien des objectifs passe par l'application de modes opératoires indépendants et relativement simples, la présence de multiples interactions se traduit par des modes opératoires totalement interdépendants, susceptibles de conduire à des conflits d'objectifs ou de ressources. Ces situations conflictuelles sont en général difficiles à gérer pour les équipes de conduite.

### Synthèse de l'analyse et quantification

Afin d'être vraiment utile, l'analyse de la complexité ne doit pas s'arrêter à un stade *qualitatif*, car il faut être en mesure de comparer divers concepts sur la base d'éléments objectifs et *quantifiables*.

Il faut aussi intégrer dans cette analyse d'ensemble de la complexité "architecturale" les autres éléments, évoqués précédemment, caractérisant la complexité individuelle de chacune des entités représentées dans le schéma d'architecture fonctionnelle. On rappelle que ces éléments individuels concernent le comportement dynamique de chaque processus physique associé aux fonctions de sûreté, les principes de fonctionnement des moyens techniques, ainsi que d'autres aspects conditionnant les contraintes pesant sur les opérateurs de maintenance (accessibilité, etc.).

Nous avons donc défini l'expression d'un *indice de complexité opérationnelle synthétique*, permettant de combiner tous ces aspects participant à cette complexité.

L'expression de cet indice de complexité, ainsi que la définition de tous les éléments intervenant dans cette expression, sont résumés sur la figure 6.

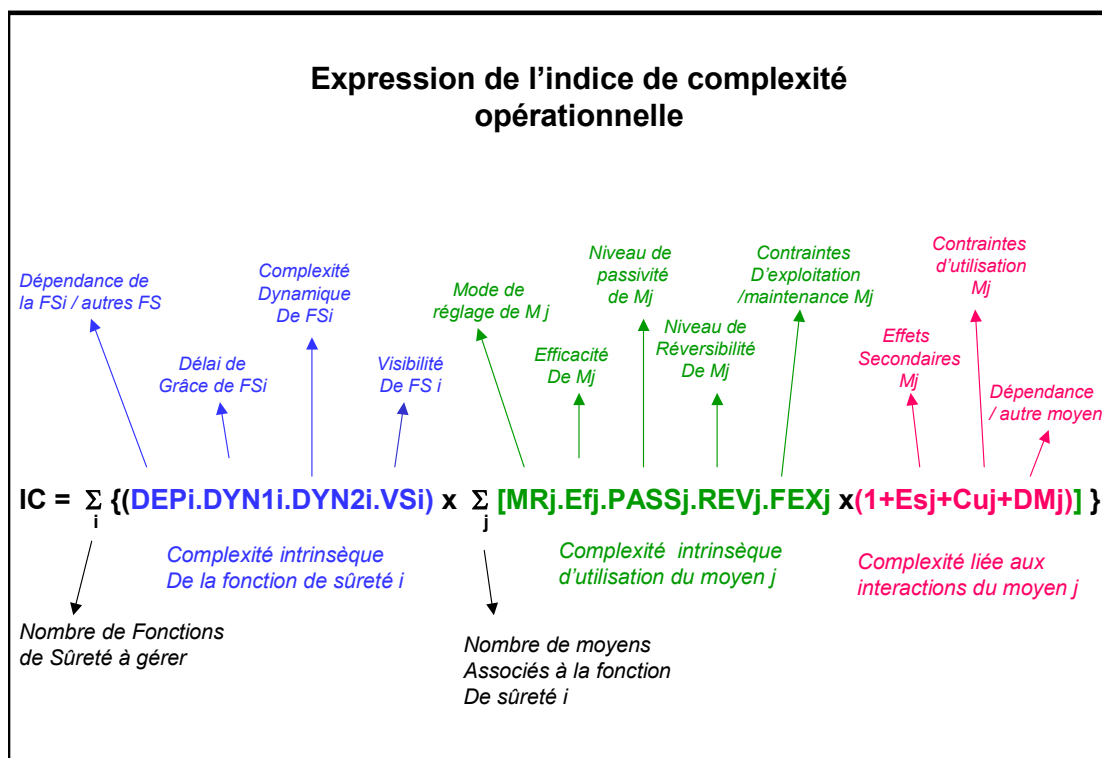


Figure 6 : définition de l'indice de complexité opérationnelle (IC)

L'indice de complexité opérationnelle d'une installation nucléaire est défini comme la somme des indices de complexité de chacune de ses Fonctions de Sûreté (du moins de celles dont la gestion incombe directement aux équipes d'exploitation).

Pour chaque Fonction de Sûreté, la complexité est définie comme étant le produit de facteurs de complexité intrinsèque au processus physique associé (comportement dynamique, visibilité, etc.) par la somme des facteurs de complexité de chacun des moyens (systèmes de sûreté) dédiés à cette fonction.

Enfin, pour chacun de ces moyens, l'indice de complexité s'obtient en effectuant le produit d'éléments de complexité propres au moyen considéré (difficulté de réglage, réversibilité, etc.) par les facteurs liés aux différentes contraintes d'utilisation liées aux interactions (effets secondaires, etc.).

### Principes de quantification

L'intérêt de cet indice est qu'il décrit un concept relativement abstrait (la complexité) sous la forme d'une combinaison d'entités plus concrètes directement liées à la conception de l'installation et de ses systèmes techniques.

Toutefois, l'évaluation quantitative requiert l'utilisation de *critères de quantification* adéquats pour chacune de ces contributions individuelles à la complexité. Il s'agit probablement de la partie la plus difficile du travail, pour laquelle nous sommes conscients du fait qu'il y a encore un potentiel d'amélioration de notre approche. La principale difficulté réside dans la définition de critères nécessitant le minimum de connaissances des caractéristiques de conception (de manière à pouvoir être

évalué en phase précoce de la conception) tout en restant représentatifs des difficultés rencontrées par les opérateurs en situation opérationnelle.

Naturellement, il est impossible d'aborder ici en détail les principes de quantification utilisés et leur justification du point de vue des facteurs humains. Seuls deux exemples de principes utilisés sont présentés ci-après, afin d'illustrer la démarche suivie et ses liens avec les études de fiabilité humaine :

- délai de grâce associé à une fonction de sûreté (DYN1 – voir figure 6) : ce paramètre définit le délai disponible, après l'occurrence d'un événement initiateur (exemple: brèche sur un circuit, etc.) avant qu'une action de conduite soit nécessaire pour restaurer l'objectif de sûreté (ex: injection de fluide pour restaurer l'inventaire en eau). Dans le domaine du nucléaire, la valeur cible utilisée est de 30 minutes : cette valeur résulte d'études spécifiques sur la fiabilité humaine en situation accidentelle. Ainsi, pour le délai de grâce DG (exemple: temps de vidange du circuit primaire), le critère de quantification utilisé sera le suivant :
  - DYN1 =1 (optimum) si DG > 30 min
  - DYN1 =2 si 1 min < DG < 30 min
  - DYN1 =3 si DG < 1 min
- Réversibilité d'un moyen (REV- cf. Figure 6) : le principe directeur de la quantification de ce paramètre est que la possibilité d'annuler les effets d'une action est un facteur déterminant de la prise de décision par les opérateurs. Ceux-ci se montreront réticents à effectuer une action dont ils savent que les conséquences (par



exemple sur la disponibilité à terme de l'installation) sont irréversibles, *même si cette action peut s'avérer vitale pour la sûreté de l'installation*. Cette caractéristique peut être reliée au caractère "pardonnant" de la conception des systèmes de sûreté.

Dans le cas de cette caractéristique, une échelle à trois valeurs a été retenue:

- REV=1 (optimum) pour des moyens dont les effets sont totalement réversibles par lancement d'une action opposée,
- REV=2 pour des moyens dont l'action opposée demande plus d'effort que l'action directe,
- REV=3 pour des moyens dont l'action peut avoir des conséquences irréversibles.

### **Application à divers concepts de réacteurs nucléaires**

A titre d'illustration des possibilités de l'approche d'analyse de complexité opérationnelle, nous avons effectué une analyse comparative de trois concepts de réacteurs nucléaires électrogènes de génération différente :

- le premier est un réacteur à eau pressurisée à 4 boucles de 1300Mwe, du type de ceux qui sont exploités actuellement en France,
- le second correspond à la nouvelle génération de ces réacteurs à eau pressurisée, de conception Franco-Allemande : le concept EPR,
- le troisième correspond à une conception plus avancée, dite de "quatrième génération", toujours pour un réacteur à eau pressurisée. Il s'agit d'une version compacte faisant d'avantage appel à des principes de fonctionnement passifs<sup>6</sup> pour les systèmes de sûreté : le concept SCOR.

S'agissant, dans les trois cas, de réacteurs dont les concepts de base sont identiques (réacteurs utilisant de l'eau sous pression comme fluide caloporteur) l'analyse comparative porte donc essentiellement<sup>7</sup> sur la conception des systèmes de sûreté dont les caractéristiques sont sensiblement différentes suivant les cas : ainsi le réacteur SCOR fait appel, autant que possible, à des systèmes à principes de fonctionnement passifs<sup>8</sup>.

### **Résultats et discussion**

La figure 7 présente les résultats obtenus, en termes de complexité opérationnelle globale, toutes fonctions de

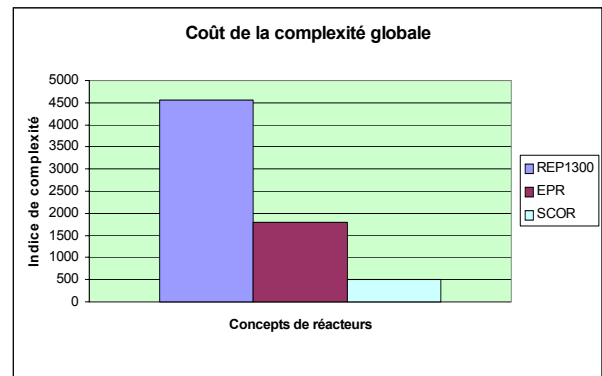
<sup>6</sup> La passivité d'un système correspond à la fois à la possibilité d'utilisation de forces motrices "naturelles" (gravité, convection naturelle, etc.) et à l'absence de signal déclencheur externe pour la mise en service du système.

<sup>7</sup> On notera toutefois que certaines différences peuvent aussi être observées au niveau des processus physiques de base, notamment au niveau des délais de grâce associés. Ceci est notamment lié au rapport entre la taille des composants principaux des circuits et les tailles de brèches susceptibles d'être observées.

<sup>8</sup> Formellement, SCOR qui est un réacteur de plus petite taille et de plus faible puissance, ne peut être directement comparé aux deux autres, dont les contraintes de conception sont probablement plus fortes. Comme pour toute analyse comparative, on devra donc être prudents dans l'interprétation des résultats bruts de l'étude.

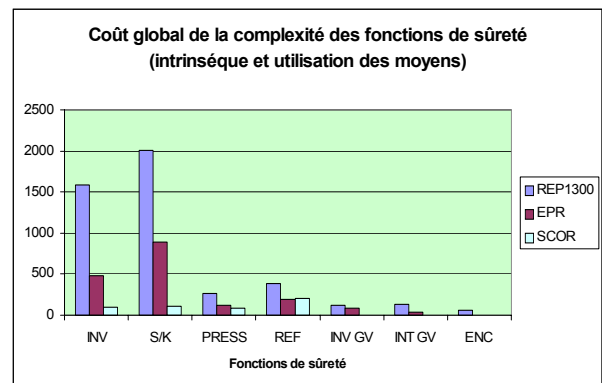
sûreté confondues : on constate un progrès significatif entre la génération actuelle et les générations ultérieures, ce qui permettrait d'envisager une amélioration de la fiabilité humaine dans l'exploitation de ces nouvelles installations.

Cette amélioration reste toutefois à confirmer par des études probabilistes plus détaillées, lorsque ces concepts (notamment le réacteur SCOR dont seuls les principes de base sont connus) seront définis plus précisément et que les caractéristiques des situations de travail des équipes d'exploitation pourront être analysées en détail.



**Figure 7** : comparaison de la complexité opérationnelle des trois concepts de réacteurs à eau pressurisée

A l'instar des études probabilistes, ce ne sont pas les résultats globaux qui sont forcément les plus intéressants mais plutôt la décomposition de ce résultat final. Dans le cas de notre étude, par exemple, il peut être intéressant d'identifier quels sont, parmi les diverses fonctions de sûreté de ces réacteurs, les principaux contributeurs à cette complexité. La figure 8 montre la décomposition de l'indice de complexité global suivant les différentes fonctions de sûreté.



**Figure 8** : décomposition de la complexité selon les différents objectifs de sûreté.

Ce type de décomposition permet d'identifier les principaux contributeurs à la complexité, ainsi que les fonctions sur lesquelles les progrès les plus significatifs ont été réalisés dans les nouvelles conceptions (ici, essentiellement au niveau des moyens prévus pour le maintien de l'inventaire en eau du circuit primaire et le maintien de la sous-criticité du cœur).

Ces observations pourraient être mises en balance avec les évaluations des *coûts de conception* de ces systèmes

avancés, afin de s'assurer que les modifications les plus coûteuses sont aussi les plus "rentables" du point de vue de la simplification de l'exploitation.

La prise en compte des difficultés d'exploitation en phase précoce de la conception apparaît de ce fait comme une étape significative dans une démarche d'optimisation en *coût de possession*<sup>9</sup>, au lieu de se limiter à la considération du seul coût d'investissement.

Cependant, pour aller plus loin dans cette démarche, il conviendrait de définir de façon plus précise les éléments de complexité liés aux *activités de maintenance*, qui interviennent de façon significative dans le coût d'exploitation. Pour l'instant, cet aspect de la complexité est représenté par un seul paramètre (Fex- voir figure 6) définissant globalement les contraintes de maintenance des différents systèmes techniques. Cette représentation globale est probablement insuffisante pour traiter tous les aspects liés à la maintenance (ex : fréquence d'intervention, accessibilité, conditions d'ambiance physique, etc.).

## **Conclusion**

Dans ce papier, une démarche novatrice de prise en compte des facteurs humains à la conception est présentée. Cette approche permet d'évaluer les *contraintes d'exploitation* (conduite et maintenance), prévisibles en phase précoce de la conception d'une installation, et ainsi d'essayer de les minimiser lorsque des modifications sont encore envisageables, à un coût minimum.

Naturellement, la minimisation des contraintes d'exploitation n'est pas le seul critère (loin s'en faut !) à prendre en compte dans une démarche d'optimisation du design. Mais il est important, pour les concepteurs, de garder à l'esprit que les options de conception qu'ils proposent ont un impact déterminant sur la fiabilité humaine et, au delà, sur la sûreté et l'efficacité en exploitation.

Ainsi, si l'on veut passer d'une logique d'optimisation en coût d'investissement à une logique, plus réaliste, de coût de possession (intégrant les coûts d'exploitation), ces aspects liés à la performance humaine devront être considérés à titre préventif, avec toute l'attention qu'ils méritent, dès le début de la conception *de l'installation*, plutôt qu'uniquement à titre curatif, lors de la conception des *moyens de conduite*.

La mise en application de cette démarche concerne pour le moment l'industrie nucléaire, pour laquelle la préoccupation de sûreté et d'innocuité pour l'environnement est un élément déterminant de la conception. La minimisation des contraintes d'exploitation devrait donc trouver naturellement sa place dans la conception des installations futures, dans la mesure où la performance humaine impacte directement le niveau de sûreté de ces installations.

Cependant, même dans ce domaine spécifique, il faut être conscient que le bénéfice attendu d'une bonne intégration des FH dans la conception ne concerne pas uniquement la sûreté, mais aussi la disponibilité et la productivité en exploitation, c'est-à-dire l'ensemble des déterminants de la *sûreté de fonctionnement* de l'installation.

Cette démarche n'est donc pas limitée au domaine nucléaire et devrait pouvoir être appliquée à la conception de tout type d'installation industrielle. L'approche d'analyse de la *complexité opérationnelle* qui est proposée est d'ores et déjà applicable à tout type d'installation mettant en jeu des processus physiques continus (énergétiques, chimiques, etc.), pour peu qu'à ces processus puissent être associés des objectifs de sûreté de fonctionnement formalisés. Le cas des processus de type discontinus (exemple : chaîne de conditionnement de déchets, etc.) nécessitera des analyses complémentaires, car il est probable que les concepts utilisés dans notre approche doivent être adaptés aux aspects spécifiques de ces installations.

Cet *élargissement du domaine d'application* constitue un des objectifs que nous nous sommes donné, dans la mesure où il est prévisible que les installations nucléaires futures seront des installations en site intégré, regroupant des processus continus (réacteurs, transformations physico-chimiques, etc.) et des processus fonctionnant en batch (traitement et conditionnement des déchets, fabrication de combustible, etc.).

Un autre objectif à atteindre sera de consolider les principes d'évaluation de la complexité, notamment au niveau des critères de quantification utilisés. A ce niveau, une large concertation est à mener avec des spécialistes de la fiabilité humaine, afin de s'assurer que l'ensemble des facteurs d'influence significatifs ont été pris en compte et que l'importance relative de ces facteurs est bien respectée dans l'expression globale de la complexité opérationnelle.

## **Cadre de réalisation**

Ce travail a été réalisé dans le cadre du projet MRINS (CEA/ Direction de l'Energie Nucléaire/ Direction du Développement et de l'Innovation Nucléaire / Domaine Maîtrise des Risques)

## **Références**

[1] J-P. DELAHAYE : "La complexité mesurée"  
Pour la Science N°314 (12/03)

[2] S.G. COLLIER et al. : " Human reliability data from simulator experiments : principles and context sensitive analysis" PSAM7/ESREL 04 (2004)

---

<sup>9</sup> La notion de coût de possession intègre l'ensemble des éléments de coût liés au cycle de vie d'une installation, notamment ceux liés aux activités d'exploitation.