



**HAL**  
open science

# Investigation avancée des méthodes d'étude probabiliste de l'efficacité des actions humaines dans les systèmes socio-techniques

Antonello de Galizia, Christophe Simon, Philippe Weber, Benoît Iung, Carole Duval, Emmanuel Serdet

## ► To cite this version:

Antonello de Galizia, Christophe Simon, Philippe Weber, Benoît Iung, Carole Duval, et al.. Investigation avancée des méthodes d'étude probabiliste de l'efficacité des actions humaines dans les systèmes socio-techniques. 11ème Congrès International Pluridisciplinaire en Qualité, Sécurité de Fonctionnement et Développement Durable, QUALITA 2015, Mar 2015, Nancy, France. hal-01149770

**HAL Id: hal-01149770**

**<https://hal.science/hal-01149770v1>**

Submitted on 7 May 2015

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Investigation avancée des méthodes d'étude probabiliste de l'efficacité des actions humaines dans les systèmes socio-techniques

Antonello De Galizia<sup>†</sup>, Christophe Simon<sup>\*</sup>, Philippe Weber<sup>\*</sup>, Benoit Iung<sup>\*</sup>, Carole Duval<sup>†</sup>, Emmanuel Serdet<sup>†</sup>

Centre de Recherche en Automatique de Nancy,  
Université de Lorraine, CNRS UMR 7039,  
Bd des Aiguillettes, 54506, Vandœuvre lès Nancy, France  
@ : {philippe.weber;christophe.simon}@univ-lorraine.fr

<sup>†</sup>EDF Dept. MRI, 1 Av. Général de Gaulle,  
Clamart, France

**Résumé**—Cet article traite de l'analyse de la fiabilité humaine (HRA) dans le contexte de la maintenance et du fonctionnement normal d'un système industriel hautement fiable au sein de la méthode d'analyse intégrée des risques portée par EDF et le CRAN. Basée sur un état de l'art des méthodes de HRA, une identification des critères pertinents décrivant la fiabilité humaine est faite. Les méthodes et les bonnes pratiques au sein des HRA sont étudiées et discutées. Nous mettons un accent particulier sur les critères/descripteurs proposés qui sont différents des pratiques usuelles de la méthode MERMOS-A exploitée à EDF. Enfin, des conclusions et perspectives sont données concernant le développement d'une méthodologie permettant d'évaluer l'efficacité des barrières humaines dans les systèmes socio-techniques dans des conditions organisationnelles et environnementales données.

## I. INTRODUCTION

Au cours des dernières années, les progrès technologiques ont conduit à une diminution des accidents dus à des défaillances techniques dans les systèmes complexes à haut risque industriel tels que les centrales nucléaires, les avions et les usines chimiques. L'homme continue à jouer un rôle important dans les différentes phases du cycle de vie de ces systèmes et est souvent considéré dans les études de sûreté comme un facteur pathogène. Toutefois, il est également un facteur de résilience des systèmes. Toutes les activités humaines effectuées dans ces phases du cycle de vie sont influencées par des conditions ou des situations spécifiques de travail que l'on nommera «contexte» caractérisée par le triptyque MTO (Man, Technology, Organisation) [1].

Dans l'analyse de l'erreur humaine (HEA) [2] ou dans l'analyse de la fiabilité humaine (HRA) pour l'évaluation de la sécurité, les conditions qui influencent la performance humaine ont été représentées par plusieurs «facteurs contextuels». Ces facteurs contextuels sont désignées par des termes différents selon la méthode employée : Performing Shaping Factors (PSF), Performing Influence Factors (PIF), Influencing factors (IF), Performance Affecting Factors (PAF), Error Producing Conditions (EPC), Common Performance Conditions (CPC), etc.

Les PSF ou PIF sont utilisés comme des causes ou des

contributeurs à la non-sécurité, aux actions humaines dans l'analyse des événements indésirables et donnent également une base pour l'évaluation de la contribution du facteur humains sur le niveau de sécurité [1], [3]. Des analyses HRA ont été effectuées dans le cadre de l'évaluation probabiliste de la sûreté (PSA) de systèmes socio-techniques complexes telles que des centrales nucléaires. PSA est une approche tente de tenir compte de tous les scénarios d'accidents possibles et évalue la sécurité globale d'un système en utilisant un arbre d'événements (ET) et un arbre de défaillance (FT) sous la forme d'un nœud papillon. Les scénarios d'accidents sont alors composées des deux composants de défaillance, les événements humains de défaillance (HFE) et les événements matériel (système/ composant). Une analyse HRA est requise pour l'estimation de la probabilité d'occurrence des HFE.

Il existe différentes approches pour évaluer la fiabilité humaine. En général, ces approches peuvent être classés en deux catégories. Celles qui utilisent la corrélation temps-fiabilité et celles qui utilisent les FIP. Pour les méthodes utilisant les FIP, certaines d'entre elles utilisent un ensemble de descripteurs pour ajuster la probabilité d'erreur humaine de base comme THERP [2], HEART [4], CREAM [1], et d'autres définissent la HEP par des taux et l'intégration de FIP comme SLIM [3], etc.

Dans la suite de cet article, nous proposons un état de l'art des techniques de HRA au travers d'une grille de comparaison afin de mettre en évidence les caractéristiques de chaque technique et de leurs applications dans l'évaluation des risques. Cette grille de comparaison est basée sur l'application de critères comme les modèles théoriques sous-jacent, les modes d'analyse et les éléments spécifiques caractérisant chaque technique.

## II. EVALUATION DE LA FIABILITÉ HUMAINE POUR LES SYSTÈMES COMPLEXES

En réponse aux besoins du marché, des systèmes technologiquement avancés ont été développés pour fournir la flexibilité et la rapidité de la production attendue. L'utilisation

de technologies de pointe a conduit à des problèmes de fiabilité. Ce concept de fiabilité est étroitement lié au risque et à la sécurité des travailleurs. En effet, les systèmes hautement fiables ne sont pas nécessairement hautement sûrs et des systèmes hautement sûrs ne sont pas nécessairement fiables. Il s'agit bien de notions différentes. Il a été observé que les défaillances du système en raison de l'intervention humaine ne sont pas négligeables [5] en particulier, une erreur humaine est la cause d'échec systèmes aux conséquences majeures.

En général, dans l'analyse de la fiabilité des systèmes, l'évaluation se concentre sur le processus industriel et sur les technologies qui le constitue, sans tenir compte des aspects qui dépendent de facteur humain. Mais, il convient de noter que l'erreur humaine est un contributeur majeur à la sécurité et la fiabilité de nombreux systèmes : plus de 90% dans l'industrie nucléaire [3], plus de 80% dans les industries pétrochimiques et chimiques [5], plus de 75% dans les accidents du domaine de la marine [5], et plus de 70% des accidents de l'aviation [6]. Pour cette raison, dans les domaines industriels à haut risque, tels que le nucléaire, l'aérospatiale et de la pétrochimie, il y a nécessité d'exploiter des techniques d'analyse des risques couplées avec des méthodes d'évaluation des facteurs humains (HRA).

Les méthodes HRA tombent dans le domaine des facteurs humains qui a été définie comme l'application d'informations pertinentes sur les caractéristiques et le comportement humain lors de la conception d'objets, d'installations et d'environnements que les personnes utilisent [7]. Ces techniques peuvent être utilisées de manière rétrospective, dans l'analyse des incidents, mais également de manière prospective pour examiner un système. La plupart des méthodologies sont fermement ancrés dans une approche systémique qui voit la contribution humaine dans le contexte de son environnement et son organisation [8]. Le but est d'examiner la tâche, le processus, le système et la structure organisationnelle pour détecter les faiblesses dues aux erreurs s'en cherche à en attribuer les fautes. Tout système dans lequel l'erreur humaine peut survenir, peut être analysé avec une méthode HRA, ce qui signifie en pratique, presque tout processus dans lequel les humains sont impliqués [8].

Dans ce contexte, le Département MRI d'EDR R&D a contribué au développement des HRA avec MERMOS (Méthode d'évaluation de la Réalisation des Missions Opérateur pour la Sûreté) [9], une technique de deuxième génération capable de déterminer la probabilité de défaillance d'une mission humaine dans des conditions accidentelles, dans les centrales nucléaires. En outre, depuis 2006, pour des conditions nominales et incidentelle, le département MRI et le CRAN ont développé une approche innovante pour prendre en compte dans une analyse de risque, non seulement la dimension technique mais aussi humaine, les facteurs liés aux équipes et des facteurs organisationnels, dans des conditions organisationnelles et environnementales spécifiques. Il s'agit de l'Analyse Intégrée des Risques (AIdR) [10].

### A. La méthodologie AIdR

La méthodologie AIdR est une approche multidisciplinaire nouvelle qui cherche à tenir compte des risques associés aux différents «niveaux» d'analyse dans un cadre intégré. Elle prend en compte les effets de propagation "top-down" qui existent entre l'organisation du système, les équipes d'exploitation et les composants techniques impliqués dans le système. Contrairement aux techniques HRA de première génération, l'AIdR ne se focalise pas sur l'opérateur unique. Elle se concentre davantage sur l'identification et l'évaluation des influences existantes entre l'organisation, de l'environnement et les équipes. Selon un tel point de vue global, l'efficacité de l'action humaine est censé contribuer à la disponibilité des «barrières de sécurité» visant à réduire l'événement redouté. L'efficacité humaine est évaluée par la caractérisation du fonctionnement du système selon trois niveaux : les composants techniques, le management et les équipes (e.g. formation, délégation, expérience, etc.), et les facteurs organisationnels.

La modélisation est assurée par un réseaux bayésien ou de fonctions de croyances afin de laisser l'analyste estimer les différentes combinaisons de facteurs produisant les risques même si ces facteurs pourraient être de différentes natures. La méthodologie a une base théorique solide et a montré sa pertinence [10]. Néanmoins, des améliorations dans l'IRA sont requises pour aller plus loin, améliorer l'évaluation des probabilités de défaillance humaine sous contraintes organisationnelles et environnementales. L'objectif est donc de développer une nouvelle approche couplant l'AIdR et des méthodes HRA reconnues pour obtenir des estimations fiables de l'efficacité des barrières humaines.

### B. Aperçu des méthodes HRA

De nombreuse méthodes d'analyse de la fiabilité humaine ont été développés ces dernières années. Cela a conduit les chercheurs à analyser avec précision les informations disponibles afin de comprendre ce qui pourrait être la meilleure approche de HRA. L'information se rapporte aux coûts, la facilité d'application et d'analyse, la disponibilité des données, leur fiabilité et leur validité [11]–[13]. Les méthodologies développées relèvent de deux catégories : première et seconde génération.

Les méthodes de première génération sont de l'ordre de 40, dont beaucoup sont des variations d'une seule méthode. La base théorique qui concerne la plupart de ces méthodes sont :

- l'erreur de classification selon le concept «omission-commission» ;
- définition des «facteurs type de performance" (PFS) ;
- modèles cognitifs de type SRK (basés sur les compétences, les règles et la connaissance)

La théorie la plus accrédité pour définir et classer une mauvaise action est la méthode de classification d'erreur selon le concept «omission-commission» [14]. Ce concept comprend les notions suivantes : omission identifie une action qui n'est pas faite, se fait tard, ou se fait à l'avance ; commission est la mise en œuvre d'une performance de l'opérateur qui n'est pas requise par le processus. A partir de ces théories, des modèles

de prédiction de première génération ont été développés et la technique la plus représentative est THERP (Technique for Human Error Rate Prediction) [2].

Les méthodes de deuxième génération, terme inventé par Doughty [15], essayent de surmonter les limitations des méthodes traditionnelles, en particulier :

- fournir des orientations sur les chemins de décision possibles et probables suivies par les opérateurs, en utilisant des modèles mentaux des processus prévus par la psychologie cognitive ;
- d'étendre au-delà de la description des erreurs classification binaire habituelles (omission-commission), reconnaissant l'importance des «erreurs cognitives» ;
- tenir compte des aspects dynamiques de l'interaction homme-machine (IHM) et être utilisé comme base pour des simulateurs de la performance opérateur.

Afin d'estimer et analyser la fiabilité cognitive, un modèle approprié de traitement de l'information humaine est nécessaire. Les modèles cognitifs les plus populaires sont basés sur les théories suivantes :

- Paradigme S.O.R. (Stimulus-Organism-Response) fait valoir que la réponse est fonction de l'organisme et de la réponse. Ainsi, un stimulus agit sur l'organisme qui à son tour génère une réponse ;
- l'homme comme un mécanisme de traitement de l'information. Selon cette vision, les processus mentaux sont parfaitement spécifiés et les états mentaux sont définis à partir de relations causales avec d'autres entrées sensorielles et les états mentaux eux-mêmes. C'est une théorie récente qui voit l'homme comme un système de traitement de l'information (IPS) ;
- Approche cognitive. Dans cette théorie, la cognition [16] est considérée comme active plutôt que réactive. En outre, l'activité cognitive est défini dans un mode cyclique plutôt que séquentiel.

A partir de ces théories, ont été développées des méthodes cognitives et contextuelles de deuxième génération. Les techniques les plus représentatives sont : ATHEANA (A Technique for Human Error ANALysis) ; CREAM (Cognitive Reliability and Error Analysis Method) et MERMOS.

### C. Méthodes HRA de première génération

Ces outils ont été les premiers à être mis au point pour aider les analystes à prévoir et à quantifier la probabilité d'erreur humaine. Les approches de première génération ont tendance à être atomistique par nature. Elles encouragent l'évaluateur à segmenter une tâche en composantes et à examiner ensuite l'impact potentiel de facteurs modificateurs tels que la pression du temps, la conception des équipements et le stress. Ces méthodes se concentrent sur les compétences et la base de règles au niveau des actions humaines. Elles sont souvent critiquées pour ne pas tenir compte d'éléments comme l'impact du contexte, les facteurs organisationnels et les erreurs de commission. Malgré ces critiques, Elles sont utiles et beaucoup sont utilisés régulièrement pour des évaluations quantitatives des risques.

### D. HRA méthodes de deuxième génération

Le développement d'outils de la «deuxième génération» a commencé dans les années 1990 et est en cours. Leurs avantages doivent encore être établis. En outre, des analyses sont en cours pour être validés par les autorités nucléaires. Kirwan rapporte que les outils les plus notables de la deuxième génération sont ATHEANA, CREAM et MERMOS [17]. La littérature montre que ces méthodes sont généralement considérées comme en développement, mais que, dans leur forme actuelle, elles peuvent fournir des indications utiles sur des questions de fiabilité humaine.

Pour présenter ces méthodes (cf. tableau II), nous proposons d'utiliser une taxonomie employée dans le département MRI. Cette première classification va nous permettre de distinguer trois groupes fondamentaux de méthodes. Les méthodes qui sont dites :

- factorielle ;
- contextuelle ;
- à avis d'experts.

### E. Méthodes factorielles

Ces méthodes utilisent principalement des PSF liés à l'environnement de travail qui peut donner lieu à des types spécifiques d'erreurs. Ces méthodes considèrent que les PSF ont un impact direct sur la performance de la tâche. On citera par exemple le temps disponible pour effectuer l'action, l'interface homme-machine (IHM), la formation, les procédures, l'organisation et la complexité de la tâche. L'effet de ces facteurs sont pris en compte dans la quantification de l'erreur humaine.

1) *THERP*: La méthode THERP est l'archétype de ces méthodes factorielles. Son développement a commencé en 1961, mais l'essentiel du travail a été fait au cours des années 1970 et a donné lieu au guide THERP [2]. C'est une méthode de première génération qui signifie que ses procédures suivent la voie de modèles classiques d'analyse de la fiabilité classique (machine ou composants mécaniques). Le but de cette méthode est de calculer la probabilité de la performance réussie des activités nécessaires à la réalisation d'une tâche. THERP consiste à effectuer une analyse des caractéristiques de performance des tâches humaines analysées. Les résultats sont représentés graphiquement dans un arbre d'événements HRA, qui est une représentation formelle de la séquence des actions nécessaires.

THERP s'appuie sur une vaste base de données de la fiabilité humaine des HEP, qui est basée sur des données d'installations et des jugements d'experts correspondants. THERP a été la première méthode HRA à être largement utilisée et l'est encore dans une large gamme d'applications, même au-delà de son cadre d'origine nucléaire. Elle décrit à la fois comment les événements devraient être modélisés et comment ils doivent être quantifiés. Cependant, la représentation des HRA sous forme d'arbre d'événements (ET) signifie que le système de classification et le modèle sont limités par des choix binaires (échec ou réussite). Une caractéristique finale de THERP est l'utilisation de PSF pour compléter l'analyse des tâches. L'utilisation de cette technique pour tenir compte

des influences non spécifiques se trouve dans la plupart des méthodes de première génération HRA [12]. L'utilisation séparée de PSF est pertinente pour une évaluation complète du modèle de fonctionnement de l'opérateur. Toutefois, il suggère que le modèle, par lui-même, est indépendant du contexte.

2) *Méthodes contextuelles*: Les modèles contextuels de l'activité humaine utilise principalement le concept de EPC (Error Producing Conditions). Ce sont des propriétés de contexte liés à l'histoire du système, son organisation, les caractéristiques de l'interface. Elles influent sur la nature et le contenu de l'exécution de la tâche confiée à l'opérateur. Ces méthodes sont utilisés pour identifier les principaux types d'erreurs et proposer des mesures pour les réduire. Ces méthodes considèrent que l'erreur est principalement due au contexte de l'activité.

3) *ATHEANA*: ATHEANA est à la fois une méthodologie de HRA rétrospective et prospective développée par la NRC en 2000. Elle a été développée dans l'espoir que certains types de comportement humain dans les usines et les industries nucléaires, qui utilisent des procédés similaires, pourraient être représentés d'une manière commune plus faciles à comprendre. Elle vise à fournir un cadre psychologique solide pour évaluer et identifier les PSF - y compris les facteurs organisationnels / environnement - qui ont poussé les incidents impliquant des facteurs humains, surtout avec l'intention de suggérer des améliorations de processus. C'est essentiellement une méthode pour représenter les rapports d'accidents complexes au sein d'une structure normalisée, ce qui peut être plus facile à comprendre et à communiquer. La probabilité d'une HEP dans ATHEANA, étant donné un initiateur particulier, est déterminée en additionnant les différentes conditions forçant l'erreur associé tout en tenant compte de la probabilité d'actions dangereuses compte tenu de la CEF, et la probabilité d'aucune action de récupération compte tenu de l'EFC et de l'UA. L'avantage le plus important de ATHEANA est qu'elle fournit une compréhension plus riche et plus globale du contexte sur les facteurs humains connus pour être la cause de l'incident, par rapport à la plupart des premières méthodes. Par rapport à de nombreuses autres méthodes de quantification HRA, ATHEANA permet de tenir compte d'un plus large éventail de PSF et également n'exige pas que ceux-ci soient considérés comme indépendants. Ceci est important car le procédé vise à identifier toutes les interactions qui affectent la pondération des facteurs influant sur la situation. En revanche, la méthode est lourde et nécessite une grande équipe d'analystes, elle n'est pas suffisamment détaillée garantissant que différentes équipes produiront les mêmes résultats [18].

4) *CREAM*: CREAM a été développée par Hollnagel en 1998 [1] à la suite d'une analyse des méthodes HRA existantes. C'est la technique de HRA de deuxième génération la plus largement utilisée. Elle se focalise sur trois principaux domaines de travail; analyse des tâches, les possibilités de réduire les erreurs et la possibilité d'examiner la performance humaine en ce qui concerne la sécurité globale d'un système. Cette méthode est utilisée le but d'évaluer la probabilité d'une erreur humaine se produisant tout au long de la réalisation

d'une tâche spécifique. A l'issue de l'analyse, des mesures peuvent être prises pour réduire la probabilité qu'une erreur se produise au sein d'un système et donc conduire à une amélioration du niveau global de sécurité. Par rapport à de nombreuses autres méthodes, CREAM propose une approche très différente de la modélisation de la fiabilité humaine. Il en existe deux versions (basique et étendue). Elles ont deux principales caractéristiques communes; capacité à identifier l'importance de la performance humaine dans un contexte donné et un modèle cognitif utile et le cadre associé, utilisable à la fois pour l'analyse prospective et rétrospective. L'analyse prospective permet d'identifier les erreurs humaines alors que l'analyse rétrospective quantifie les erreurs qui ont déjà eu lieu. La théorie de la cognition est inclus dans le modèle par l'utilisation de quatre «modes de contrôle» de base qui identifient les niveaux de contrôle que l'opérateur a dans un contexte et des conditions différentes. Le mode de contrôle particulier détermine le niveau de fiabilité que l'on peut attendre dans une situation particulière et il est à son tour déterminé par les caractéristiques collectives des conditions de performance communes (CPC).

5) *MERMOS*: MERMOS est une amélioration d'une précédente méthode HRA de EDF [14], [19]. Elle a été conçue initialement pour guider les analystes d'EDF en prenant en compte le facteur humain dans les PRA de «niveau 1» pour la série N4 de centrales nucléaires françaises. Dans la méthodologie, une «mission facteur humain» constitue l'interface entre la PRA et la HRA. Pour chaque initiateur, une analyse fonctionnelle permet de déterminer les «missions» qui doivent être réalisées pour récupérer ou atténuer l'accident. Les défaillances d'une mission ou de plusieurs missions consécutives entraînent des conséquences inacceptables. Parmi les missions, celles des facteurs humains se réfèrent à la sécurité d'actions critiques que le système avec l'équipe interagissant selon les procédures avec les systèmes et l'organisation, doivent initier et mener à bien pour gérer les situations. L'un des objectifs est d'évaluer l'échec post-initiateur d'une mission facteur humain (HF). MERMOS définit que l'exécution de la mission HF est de la responsabilité d'un système appelé «système des opérations d'urgence» (EOS) [20], [21]. Stratégie, action, et diagnostic (SAD) sont les trois fonctions impliquées dans l'exécution des missions de HF assumées par l'EOS [22]. Le fonctionnement réel du système est modélisé à l'aide d'un nouveau concept, nommé CICA ("Important Characteristics of Emergency Operation»). CICA se réfère à des manières particulières de fonctionnement de l'installation adoptée par l'EOS dans le cadre de la situation d'urgence [21]. L'objectif de l'analyse qualitative MERMOS est d'identifier des scénarios plausibles faisant référence au modèle SAD menant à l'échec de la mission HF.

6) *Méthodes fondées sur le jugement des experts*: Ces méthodes sont axées sur la détermination des probabilités d'erreur à partir de jugements d'experts. La fiabilité des estimations est très dépendante de la complexité des situations analysées, des experts sélectionnés et de la façon dont les jugements sont regroupées pour produire des estimations.

Le plus représentatif pour cette catégorie sont APJ, SLIM, HORAAM et PC. Nous n'irons pas plus loin dans la description de ces derniers en raison de leur moindre utilisation.

#### F. Critères pour comparer les méthodes HRA

Des critères d'analyse ont été développés pour évaluer et comparer les méthodes HRA selon leurs besoins spécifiques.

TABLE I  
CRITÈRES RETENUS POUR LA SÉLECTION DES MÉTHODES HRA.

Nom	Taxonomie	description
Cadre théorique principal	— Comportementaliste — Cognitive — Cognitive située <sup>4</sup>	Les bases théorique et les hypothèses de modélisation du comportement humain à la fois pour la phase quantitative et qualitative de l'analyse.
Origines de données	— Entrées — prédéfinis	Distinction entre les données qui existent déjà dans le modèle et les données d'entrée provenant d'autres sources : la rétroaction, les résultats des tests, des enquêtes sur simulateur, les probabilités d'erreur nominaux etc.
Nature des données	— quantitative — qualitative - ordinaire <sup>5</sup> — qualitative - nominale <sup>6</sup>	Nous nous référons aux méthodes utilisant des données à caractère essentiellement qualitatives (noms, etc.) ou quantitatif (nombre, taux d'échec, etc.).
Approche de traitement	— Fréquentiste — Bayésienne	Elle se réfère au traitement pour l'évaluation quantitative des données. Cela dépend du type de données traitées.
Analyse cible	— Opérateur — Equipe d'exploitation — Système — Individu	C'est le domaine de l'opérabilité de la méthode.
Couverture des PSF	— Groupe — Système — Environnement	Caractéristiques personnels et les capacités de travail de l'opérateur. Les procédures et les caractéristiques des tâches requises pour l'opérateur. Système : MMI, Systèmes matériels, et les caractéristiques physiques du processus. Environnement : équipe et facteurs organisationnels, et l'environnement physique de travail.

4. Les théoriciens de la cognition située suggère qu'apprentissage/connaissance ne peut être dissocié du contexte social, culturel et physique.

5. Les données sont ordinales si elles ont caractère ordonné intrinsèque.

6. Espace nominal sans ordre particulier

Dans cet article, nous traitons des systèmes socio-techniques complexes où la prise en compte des actions humaines et de l'environnement est essentielle dans le processus de gestion des risques. Dans l'industrie nucléaire, comme dans d'autres domaines, l'évaluation des méthodes de fiabilité humaine ont été mis en œuvre et intégré à l'analyse des risques mais il est encore difficile de déterminer exactement les raisons de l'application de certaines plutôt que d'autres. Les critères identifiés cherchent à répondre à ce besoin. Elles sont brièvement présentés dans le tableau I. Ces critères ont été appliqués pour comparer les méthodes HRA présélectionnés en raison de leur mise en œuvre réelle dans les PRA du nucléaire. Elles sont énumérés dans le tableau II.

TABLE II  
MÉTHODES HRA CHOISIES POUR ÊTRE UTILISÉES DANS LES ÉTUDES DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE.

Méthode	Références	Date
THERP <sup>1</sup>	Swain & Guttman - Rapport WASH1400 / NUREG 75/014	1983
SLIM <sup>1</sup>	Embrey & Kirwan - CNRC NUREG / CR-3518	1984
HCR <sup>1</sup>	Hannaman & Spurgin - EPRI RP 2170-3	1984
TIPOD-DELTA <sup>1</sup>	SHELL	1985
HEART <sup>1</sup>	Williams - CNRC	1988
CREAM <sup>2</sup>	E. Hollnagel - Halden (Norvège)	1994
ATHEANA <sup>2</sup>	Cooper et al. - CNRC NUREG / CR-6350	1996
MERMOS <sup>2</sup>	Le Bot et al. - EDF	1998
SPAR-H <sup>2</sup>	Gertman et al. - CNRC NUREG / CR-6883	1999
NARA <sup>3</sup>	British Energy (Royaume-Uni)	2005

Compte tenu d'un examen cohérent de la littérature existante et en fondant sur l'expertise MIR Département sur le champ de la fiabilité humaine et les facteurs humains, nous procédons à la construction d'une grille de référence visant à comparer les méthodes dans le tableau II. Cette grille d'analyse est présentée dans le tableau III, qui résume les résultats de l'application des critères pour les méthodes d'étude.

En conséquence de la grille de référence, il convient de noter que toutes les méthodes utilisent des modèles et d'autres connaissances de base sous-jacente de la façon dont ils se rapprochent des réalités de la performance humaine. En outre, toutes les hypothèses d'utilisation et d'autres jugements qui, dans l'état actuel de la technique dans HRA, doivent encore être étayées par des données appropriées. Certaines bases pour certaines méthodes sont plus faibles que d'autres et, avec les progrès continus et l'évolution prévue dans la méthodologie HRA, il est prévu que certaines méthodes seront moins utilisés tandis que d'autres, ou même de nouvelles méthodes deviennent plus fréquents. Cela ne signifie pas que les méthodes actuelles ne peuvent pas être utilisées avec succès en ce sens que pour de nombreuses applications, des estimations

1. Première génération

2. Deuxième génération

3. Troisième génération [13]

raisonnables de HEP peuvent être obtenus et les problèmes potentiels peuvent être identifiés. En fait, pour les décisions de risque informé que doivent être faits, il ya eu des utilisations réussies de PRA et HRA pour des évaluations des risques généraux de centrales en exploitation et pour des applications telles que le classement des composants pour les règles de maintenance, l'évolution des spécifications techniques, et de procéder à des évaluations dans l'importance des risques des activités concernées par les processus industriels.

### III. CRITÈRES DE COMPARAISON DES MÉTHODES HRA

La comparaison des méthodes contre les critères d'analyse et travaux antérieurs sur les bonnes pratiques au sein HRA fournit une compréhension sur les fonctionnalités et limitations ou des lacunes dans les méthodes actuelles HRA utiles.

Cette connaissance a été étoffée avec les leçons tirées des progrès sur les études internationales récentes HRA [11], [13], [16], [23]. Ce paragraphe vise à vérifier et à étendre les résultats obtenus et les perspectives d'une phase bibliographique internationale de cette thèse, avec un accent particulier sur les résultats obtenus en appliquant les critères aux méthodes HRA analysés dans le tableau III ci-dessus. Ces études ont produit des idées importantes pour les forces et les faiblesses des méthodes et des pratiques HRA et les améliorations nécessaires identifiées dans HRA. Les principales conclusions de cette étude sont discutés ci-dessous.

#### A. *base cognitive*

Tout d'abord, nous avons identifié que toutes les méthodes ont des limites en matière de modélisation et de quantifier la performance humaine sous la rubrique «divers» conditions. Au moins une partie de l'effet peut être attribué à un manque d'une base théorique sous-jacent suffisante pour guider l'analyse, en particulier en ce qui concerne les activités cognitives associées à la compréhension des situations plus difficiles et de décider comment réagir.

Des études empiriques ont apporté la preuve que la variabilité entre méthodes et celle entre analystes, en plus d'autres facteurs, est due à un manque de bases techniques adéquates [11]. Les hypothèses sur la façon dont les opérateurs peuvent échouer et pourquoi, lors de l'application d'une méthode spécifique sont faites sur la base de la compréhension des analystes de l'usine et du comportement humain. Les méthodes HRA fournissent une base technique pour déterminer les problèmes de performances humaines et le développement des hypothèses sur comment et pourquoi les équipes ne peuvent pas accomplir une action de sécurité [24]. C'est la raison pour laquelle elles sont le plus souvent exprimés en termes de PSF, qui sont finalement utilisés dans l'estimation de la HEP. Les études empiriques montrent également que les lacunes des modèles théoriques impactent la capacité de l'analyste pour caractériser correctement les tâches et les PSF associées. Ces lacunes limitent le développement d'une bonne compréhension opérationnelle, et peuvent avoir un effet important sur la HEP.

#### B. *Relation entre l'analyse qualitative et quantification*

Beaucoup de nouvelles méthodes se concentrent sur l'identification des mécanismes de défaillance, y compris les facteurs contextuels qui y conduisent (par exemple ATHEANA [25], ou MERMOS [19]). Ces méthodes ont produit généralement une analyse qualitative supérieure (plus riche en contenu et de meilleures conclusions opérationnelles). Cependant, l'analyse qualitative elle-même ne produit pas nécessairement des HEP plus *raisonnable*. Par conséquent, une bonne relation entre l'analyse qualitative et l'analyse quantitative est nécessaire. La plupart des méthodes ont des directives insuffisantes sur la façon d'utiliser les informations de l'analyse qualitative pour déterminer les HEP. Il en est de même lorsque l'analyste va au-delà des orientations fournies par une méthode donnée pour effectuer l'analyse qualitative. En effet, il est souvent difficile de faire un usage efficace et cohérent de l'information et des résultats qualitatifs.

#### C. *Gamme de PSF couverte*

La plupart des méthodes ne semblent pas couvrir une gamme adéquate de PSF ou facteurs de causalité en tentant de prédire l'efficacité de l'équipe de travail pour toutes les circonstances [26]. En effet, d'importants aspects de scénarios d'accidents ne sont pas toujours capturés par les facteurs, - en particulier pour ceux qui ne considère que l'individu dans les méthodes de première génération.

#### D. *Influences des PSF et Choix d'une bonne PSF*

En regardant l'ensemble des méthodes (similaires et différentes), il y a des jugements contradictoires importants sur les PSF (par exemple, haute versus faible charge de travail, adéquation des indications). Il reste également des questions sur la manière dont cela affectent les HEP dans une situation donnée. Aucune méthode ne fournit une orientation adéquate pour de tels jugements. [26]

#### E. *Variabilité d'équipe*

Traiter variabilité d'équipe dans une HRA est toujours une question difficile [23]. L'objectif de la PRA et de la HRA est généralement de modéliser/évaluer la performance moyenne et de nombreuses méthodes (par exemple, SPAR-H, HEART) sont conçues pour évaluer cette performance de l'équipe "moyenne". Bien que les méthodes contextuelles détaillées comme ATHEANA [25] et MERMOS [9] peuvent en principe tenir compte de la variabilité d'équipe, il est difficile d'observer assez équipes et de situations pour pouvoir faire des inférences raisonnables sur les effets systématiques pour une analyse prospective d'utilisation dans un PRA. Comment aborder la variabilité équipage reste une question en suspens dans les HRA.

### IV. COMBINAISON ENTRE HRA ET AIDR

Les limitations des différentes méthodes HRA ont été identifiées et les principales conclusions ont été discutées dans les sections précédentes. Il est devenu évident qu'une nouvelle méthodologie devrait aller plus loin pour pallier ces lacunes

TABLE III  
GRILLE DE COMPARAISON DES MÉTHODES HRA DU TABLEAU II.

Méthode	Cadre théorique principal	Données prédéfinies	Nature de données	Traitement	Cible	Couverture des PSF
THERP	Comportementale	Courbes et tables TRC	Quantitative	Fréquentiste	Opérateur	Tâches humaines
SLIM-MAUD	Comportementale	Coefficients de PSF	Quantitative	Bayésien	Opérateur	Tâches humaines
HCR/ORE	Cognitive	Courbes	Quantitative	Fréquentiste	Opérateur	Tâches humaines
HEART	Cognitive	Tables	Quantitative	Fréquentiste	Opérateur & Equipe	Tâches humaines
CREAM	Cognitive	Tables de HEP nominales	Quantitative	Fréquentiste	Opérateur & Equipe	Tâches humaines & Système
ATHEANA	Comportementale & Cognitive	HEP nominales	Quantitative & qualitative	Fréquentiste	Système	Tâches humaines, Système & environnement
MERMOS	Cognition Située	Entrées(enquêtes, simulations, échelles de jugement expert)	Qualitative ordinaire	Bayésien	Système	Tâches humaines, Système & environnement
SPAR-H	Cognitive	HEP nominales	Quantitative	Fréquentiste	système	Tâches Système
NARA	cognitive	Tables de HEP nominale & base de données NARA	Quantitative	Fréquentiste	Système	Tâches humaines, Système & environnement
TRIPOD-Delta	Comportementale	Jugements d'experts	Qualitative nominale	Bayésien	Opérateur & Equipe	Tâches humaines, Système & environnement

Groupe	PSF	Description
Facteurs basés équipe	Cohésion	fréquence avec laquelle l'équipage est formée ou effectue les opérations dues comme une équipe. Comportement d'assistance mutuelle. Volonté de sacrifier le jugement vrai pour maintenir la cohésion de l'équipe
	Coordination	Le niveau auquel les différents rôles et responsabilités individuels (y compris les responsabilités de sauvegarde) sont claires pour chaque membre de l'équipe.
	Composition	Taille de l'équipe, homogénéité / hétérogénéité et compatibilité. La stabilité de l'équipe ou taux de rotation (Par exemple, si trop de membres sont remplacés, en particulier lorsqu'ils sont remplacés par des membres moins qualifiés, la performance de l'équipe est susceptible de se dégrader
	Disponibilité de Communication	Des moyens de communication à utiliser suffisant et disponible. La proximité physique des opérateurs et des équipements de communication (le cas échéant). Échec ou indisponibilité fonctionnelle de système de communication. La vraisemblance que l'équipement de communication soit non contrôlé.
	Qualité de Communication	Signal perturbé ou dégradation de la qualité de l'équipement de communication en raison de défaillances de l'équipement (par exemple, équipement ancien ou mal entretenu). Erreur humaine (par exemple, l'accent lourd, ambiguïté linguistique, et instruction peu claire).
	Leadership	Le rang hiérarchique, l'expérience et la fiabilité du décideur. La qualité de leadership, comprenant trois éléments : les directions, l'engagement de hommes, et capacité à surmonter les obstacles au changement. Le niveau d'engagement peut être mesurée en trois dimensions : l'identification avec le travail, l'identification avec les collègues, et l'identification avec l'organisation
Facteurs basés Gestion	Conception du processus de travail, Tâche & Direction	Calendrier et séquence de travail. Exhaustivité et exactitude de la description de la tâche. Rapidité d'affectation du travail
	Interface Homme-Système	Qualité de la conception du système pour la facilité et la précision de visuel, audio et perception cognitive de l'information. Pertinence de la répartition du travail entre automatique et manuelle.
	Culture de Sécurité et Aualité	Politique clair en termes qualité/sécurité). L'engagement de la direction à la sécurité/qualité. Réponse et engagement des individus. Violations et erreurs enregistrées dans le journal d'opération. Analyse des accidents ou presque accidents
	Environnement physique de travail	Habitabilité(par exemple, l'éclairage, la température, l'humidité, les vibrations, le bruit). Espace de travail suffisant
	Disponibilité d'outils spécifique	Outils nécessaires disponibles, bien organisés et accessibles
	Adéquation et qualité des outils	Disponibilité des outils spécifique à certaines taches
	Disponibilité des procédures	Existence et accessibilité des procédures. Contenu accessible (e.g indexation)
	Qualité et adéquation des procédures	Fidélité des documents (e.g. adéquation du niveau de détail, complétude et correspondance aux tâches actuelles.) Validité et lisibilité. Utilisabilité. Facilité de distinguer les procédures.

et améliorer la pratique conventionnelle des HRA. Le but d'une fertilisation croisée entre les techniques AIdR et HRA est de développer un outil qui pourrait être appliqué avec un minimum d'adaptation pour répondre à un large éventail de domaines et de situations. En particulier, l'objectif est d'améliorer l'évaluation probabiliste de l'efficacité humaine dans la prise de décision en fonction du risque. Ainsi, le défi majeur (i.e. le calcul de la probabilité de l'efficacité humaine) a été abordé en commençant par intégrer des PSF liés au contexte organisationnel et au collectif de travail (l'équipe) sur le cadre existant de l'AIdR [26], [27].

En fait, comme l'ont suggérées de nombreuses études sur les pratiques HRA, nous sommes convaincus que le collectif de travail et les facteurs organisationnels sont la racine de faibles efficacités humaines dans l'exécution des tâches nominales (activités de maintenance) et des événements incidentels.

Pour cette raison, nous recherchons pour un ensemble orthogonale et adapté de PSF destinés à réduire les chevauchements entre les facteurs utilisés dans l'AIdR tout en permettant les dépendances précédemment établies d'exister. Comme décrit dans [28], [29], l'approche bayésienne a été utilisée jusqu'à aujourd'hui dans la méthodologie d'AIdR pour l'estimation des dépendances causales entre les facteurs et conduisant à la probabilité de l'efficacité humaine.

Il y a des preuves substantielles que les méthodes mettant l'accent sur l'identification des mécanismes de défaillance (Manière dont les collectifs échouent dans une tâche particulière) et les facteurs contextuels qui les facilitent (e.g. ATHEANA et MERMOS), ont tendance à produire un contenu plus riche dans l'analyse qualitative que les méthodes focalisées sur les PSF (par exemple, SPAR-H, THERP, CREAM et HEART). Les relevés opérationnels résultant montrent une prévision plus détaillée de ce qui pourrait ou devrait se produire dans la réponse au scénario [11]. Cependant, les relevés opérationnels plus riches ne donnent pas nécessairement des HEP plus précis. Aussi, d'autres facteurs peuvent entrer en jeu, par exemple, des processus fiables et des guides associés pour traduire l'information plus riche en HEP [27]. Néanmoins, il semble clair que dans la variété des conditions possibles qui peuvent se produire dans un scénario d'accident, une évaluation approfondie des mécanismes de défaillance et du contexte organisationnel sera nécessaire pour des résultats fiables. C'est la raison pour laquelle nous avons pensé qu'une croisée pourrait combler de nombreuses lacunes existantes de l'AIdR et des méthodes HRA employées au Département MRI d'EDF [30].

Compte tenu des exigences pour être en mesure d'augmenter l'exhaustivité de l'AIdR, les PSF candidats pouvant assurer ces exigences ont été extraites d'une l'ensemble complet de PSF issus des méthodes HRA présentées dans le tableau II ainsi que les caractéristiques situationnelles et les facteurs humains. Grâce à des modifications itératives, l'ensemble final est composé de 12 PSF représentatives et leurs sous-caractéristiques sont présentées dans le tableau III-A. La taxonomie proposée est une conséquence directe de ce que nous avons précisé ci-dessus concernant l'importance de

l'organisation et de la gestion des facteurs. Cette sélection de PSF aura besoin d'un processus de révision en association avec le développement de la méthodologie.

Comme les domaines d'application de l'AIdR sont des situations nominales (y compris les activités de maintenance) et des conditions incidentelles spécifiques dans les centrales nucléaires (systèmes de soutien), sachant les conditions spécifiques données, c'est à dire le contexte organisationnel et environnemental, les PSF ont été identifiés pour traiter ce genre de situations d'une manière plus efficace et plus fiable.

Une représentation visuelle d'une barrière humaine partagée par les modèles AIdR et HRA classiques pour des conditions nominales et incidentelle après incorporation des PSF est illustrée à la figure 1. Les dépendances entre les facteurs sont matérialisées dans un sens «top-down» sachant que l'AIdR fonde son analyse sur l'idée que les principales situations dangereuses proviennent essentiellement de facteurs organisationnels [10], [27].

## V. CONCLUSIONS

Dans cet article, nous voulions tout d'abord de présenter un état de l'art sur les méthodes HRA usuelles, avec un accent particulier sur les méthodes les plus représentatives dans le domaine nucléaire. Ensuite, nous avons discuté des méthodes HRA sélectionnées et les avons comparées en utilisant des critères spécifiques d'analyse afin de capturer et mettre en évidence les limites et les lacunes à surmonter. La grille de référence intégrée à l'application de ces critères nous a permis de tirer quelques conclusions et perspectives de développements.

Dans la dernière partie, nous nous sommes concentrés sur une approche combinée entre l'AIdR et des techniques classiques HRA. En particulier, nous avons proposé un ensemble complet de PSF appropriées pour être incorporé dans le cadre de l'AIdR existante. Enfin, nous avons présenté le modèle AIdR résultant basé sur l'intégration des PSF.

## RÉFÉRENCES

- [1] E. Hollnagel, *Cognitive Reliability and Error Analysis Method (CREAM)*. Elsevier, 1998.
- [2] A. Swain and H. Guttman, "Handbook of human reliability analysis with emphasis on nuclear power plant applications,," NUAREG-NRC, Washington, DC., NRC 83, 1983.
- [3] D. Embrey, "Application of human reliability assessment techniques to process plant design," *Ergonomics Problems in Process Operations*, pp. 65–80, 1984.
- [4] J. Williams, "A data-based method for assessing and reducing human error to improve operational performance," in *Proceedings of the IEEE Fourth Conference on Human Factors and Power Plants*. Monterey, California : IEEE, New York, 5-9 June 1998, pp. 436–450.
- [5] J. Reason, "The contribution of latent human failures to the breakdown of complex systems," *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, vol. B327, no. 1241, pp. 475–484, 1990.
- [6] R. Helmreich, "On error management : lessons from aviation," *British Medical Journal*, vol. 320, no. 7237, pp. 781–785, 2000.
- [7] P. Humphreys, "Human reliability assessor's guide," Human Factors in Reliability Group, SRD Association., Tech. Rep., 1995.
- [8] S. Kariuki and K. Lowe, "Integrating human factors into process analyses," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 92, pp. 1764–1773., 2007.

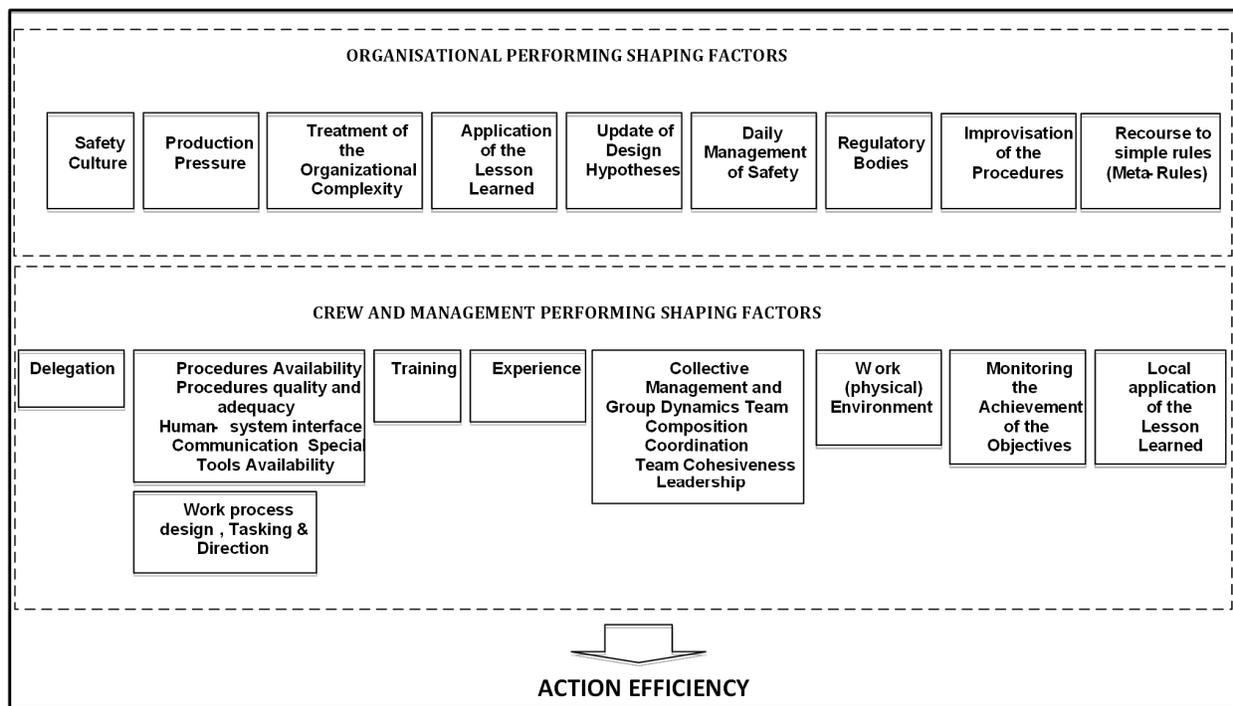


FIGURE 1. Représentation d'une barrière humaine issue de l'incorporation des PSF au sein de l'AidR

- [9] P. Le Bot and H. Pesme, "Mermos : an extended second generation hra method," in *IEEE / HPRCT*, Monterey CA, USA., 26-31 Aug 2007.
- [10] C. Duval, G. Fallet, B. Iung, P. Weber, and E. Levrat, "A bayesian network-based integrated risk analysis (ira) approach for industrial systems : Application to heat sink system and prospects development," in *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O : Journal of Risk and Reliability*, vol. 226, no. 5, 2012, pp. 488–507.
- [11] E. Lois, N. Dang, J. Forester, H. Broberg, S. Massaiu, Hildebrandt, P. Braarud, G. Parry, J. Julius, I. Mannisto, and A. Bye, "International hra empirical study-phase 1," NUREG, NUREG/IA 0216, 2009.
- [12] A. Swain, "Comparative evaluation of methods for human reliability analysis," Gesellschaft für Reaktorsicherheit GRSmbh, Köln, Tech. Rep. GRS-71, Apr. 1989.
- [13] J. Bell and J. Holroyd, "Review of human reliability assessment methods," Health and Safety Laboratory, Harpur Hill. Buxton, Derbyshire., Tech. Rep. SK179JN, 2009.
- [14] P. Le Bot, "How to deal with commission and omission errors in hra," in *ESREL*, Prague, 2009.
- [15] E. Dougherty, "Human reliability analysis - where shouldst thou turn ?" *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 29, no. 3, pp. 283–299, 1990.
- [16] M. Lyons, A. Sally, M. Woloshynowych, and C. Vincent, "Human reliability analysis in healthcare : A review of technique," *International Journal of Risk & Safety in medicine*, 2004.
- [17] B. Kirwan, H. Gibson, R. Kennedy, J. Edmunds, G. Cooksley, and I. Umbers, "Nuclear action reliability assessment (nara) : A data-based hra tool," *Safety & Reliability Journal, Safety and Reliability Society, Manchester*, 2005.
- [18] A. Kolaczowski, J. F. F. Lois, and S. Cooper, "Hra method review - asep in expert workshop on the evaluation of hra methods with respect to hra good practices," Nuclear Regulatory Commission, Rockville, Maryland, NUREG 1792, June 27-28 2005.
- [19] P. Le Bot and E. Serdet, "Mermos-a : A new method to analyze pre-initiator for specific hra," in *PSAM11 & ESREL 2012 congress*, Helsinki, Finland, 25-29 June 2012.
- [20] P. Meyer, P. Le Bot, and H. Pesme, "Mermos : an extended second generation hra method," in *IEEE / HPRCT*, Monterey CA, USA, 26-31 Aug 2007.
- [21] P. Le Bot, "The safe regulation model : A grid to describe eos (emergency operating system)," in *Présentation au Workshop ISV (Integrated System Validation)*, Halden, 2009.
- [22] S. Massaiu, P. Braarud, and P. Le Bot, "Including organizational and teamwork factors in hra : the eos approach," in *In EHPG 2013 Enlarged Halden Programme Group. Man-Technology Sessions*. IFE, 2013.
- [23] A. Mosleh, R. Boring, D. Gertman, and Y. Chang, "Human reliability analysis methods. selection guidance for nasa," NASA, Tech. Rep., July 2006.
- [24] B. Kirwan, "The validation of three human reliability quantification techniques - therp, heart, jhedi : Part i - technique descriptions and validation issues," *Applied Ergonomics*, vol. 27, no. 6, pp. 359–373, 1996.
- [25] D. of Risk Analysis and A. O. of Nuclear Regulatory Research, "Technical basis and implementation guidelines for a technique for human event analysis (atheana)," U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington DC, NUREG 1624, 2000.
- [26] R. Boring, "How many performance shaping factors are necessary for human reliability analysis ?" in *PSAM 10*. Idaho Falls, Idaho, USA. : Idaho National Laboratory, June 2010.
- [27] Z. Mohaghegh and A. Mosleh, "Incorporating organizational factors into probabilistic risk assessment of complex socio-technical systems : Principles and theoretical foundations," *Safety Science*, vol. 47, no. 8, pp. 1139–1158, Oct. 2009.
- [28] C. Simon, P. Weber, and A. Evsukoff, "Bayesian network inference algorithm to implement dempster shafer theory in reliability analysis," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 93, no. 7, pp. 950–963, 2008.
- [29] P. Weber and L. Jouffe, "Complex system reliability modelling with dynamic object oriented bayesian networks (doobn)," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 91, no. 2, pp. 149–62, 2006.
- [30] P. Le Bot, H. Pesme, and F. Ruiz, "Methodological validation of mermos by 160 analyses," in *PSA'02 International Topical meeting on Probabilistic Safety Assessment.*, Detroit, Michigan, October 2002.