

Chapitre 11

Études et recherches dans le domaine des facteurs organisationnels et humains, et plus largement des sciences humaines et sociales

11.1. De la prise en compte des facteurs humains dans la sûreté aux études relevant des sciences humaines et sociales

Les facteurs organisationnels et humains (FOH) constituent une discipline relativement nouvelle, née avec l'évolution technologique du XX^e siècle, et des facteurs de cette nature ont joué un rôle déterminant dans la plupart des accidents nucléaires. Le monde de l'énergie nucléaire s'investit de plus en plus dans cette discipline, et certains considèrent qu'il peut y avoir davantage de gains en sûreté à en tirer que dans n'importe quelle autre discipline.

Si les actions menées à la suite de l'accident de Three Mile Island se sont concentrées notamment sur les aspects ergonomiques et cognitifs des postes de travail, l'accident de Tchernobyl a soulevé des questions d'une autre nature, concernant les facteurs d'organisation. Le développement d'une « culture de sûreté » dans les installations nucléaires a en général été considéré comme la réponse adéquate. C'est du reste en 1991, cinq années

après l'accident de Tchernobyl, que fut publié (sous l'égide de l'AIEA) le rapport INSAG-4 explicitant cette notion de culture de sûreté.

Plus récemment, l'accident survenu en 2011 à la centrale de Fukushima Daiichi a mis en lumière l'importance de facteurs de nature sociétale dans la gouvernance des risques en général.

Les premiers efforts (dans les années 1970) en termes d'études et de recherches ont visé à mieux comprendre le « fonctionnement » humain et son impact sur les performances des opérateurs et techniciens dans les centrales nucléaires, non seulement lors de la conduite en salle de commande mais aussi lors de toutes les tâches et activités (d'essais, de maintenance, de contrôle en service, etc.) exécutées hors de la salle de commande et susceptibles d'avoir un impact sur la sûreté. Ces efforts se sont ensuite élargis à la compréhension et à l'évaluation des facteurs organisationnels, puis des facteurs sociétaux. Les études et recherches de l'IRSN portent également sur des aspects méthodologiques, afin de constituer et améliorer des cadres de référence et des approches pour mener ses expertises.

Les documents de l'OCDE/AEN cités en références [1] à [10] témoignent de l'intérêt soutenu de la communauté internationale aux sujets des facteurs humains puis organisationnels, ceci dès après l'accident de Three Mile Island (TMI).

Si les premières études et recherches dans le domaine des réacteurs nucléaires ont commencé dès 1977 au Département de sûreté nucléaire de l'IPSN (influence des paramètres humains dans la sûreté, méthodologie d'analyse des incidents, fiabilité humaine, ergonomie en salle de commande), c'est surtout après l'accident de Three Mile Island que les facteurs humains ont été pris en compte dans les sujets d'expertise de sûreté des installations. Au début des années 1980, l'IPSN, ainsi qu'EDF, se sont dotés de moyens plus importants avec des structures dédiées (Laboratoire d'étude des facteurs humains [LEFH] à l'IPSN, Groupe facteurs humains [GFH] à EDF). Les sujets de préoccupation étaient alors (notamment) :

- l'analyse des incidents,
- la formation du personnel d'exploitation,
- les procédures de conduite,
- les interfaces homme-machine et l'ergonomie de la salle de commande,
- l'organisation des équipes de conduite,
- la communication entre les membres des équipes de conduite,
- l'utilisation de systèmes experts,
- la télé-opération.

En 1989, l'IPSN s'est de plus intéressé à des sujets tels que :

- la maintenance en périodes d'arrêt des réacteurs du parc électronucléaire,
- la conduite avec des procédures informatisées,
- les interventions en local,

en collaboration avec EDF ou le CNRS. L'adoption par EDF d'une nouvelle organisation de la conduite des réacteurs du parc électronucléaire conduisit à nouveau l'IPSN à approfondir ce sujet.

C'est à partir de 2003 que la recherche à l'IRSN s'est accrue notamment dans le cadre de thèses, sur des sujets comme le recours à la sous-traitance, les modifications de nature matérielle ou organisationnelle dans les installations sous l'angle des facteurs humains et organisationnels, etc. La sous-traitance apparaissait en effet constituer un sujet de préoccupation en matière de facteurs humains et organisationnels, EDF y ayant fortement recours pour les opérations effectuées dans les périodes d'arrêt des réacteurs du parc électronucléaire.

En 2012, avec la création du Laboratoire des sciences humaines et sociales (LSHS) et dans le contexte post-Fukushima, les études et recherches de l'IRSN se sont élargies à des sujets de nature sociétale, autour de la gouvernance des risques nucléaires abordée sous l'angle non seulement des facteurs organisationnels mais aussi des facteurs culturels.

Par ailleurs, depuis la survenue de plusieurs accidents en radiothérapie comme ceux survenus à Épinal et à Toulouse, l'IRSN a élargi son champ d'investigations à ce secteur, avec des recherches sous l'angle du processus d'appropriation de nouvelles technologies et de la gestion de la conformité²¹⁴.

De façon générale, une caractéristique particulière des actions menées par l'IRSN en matière de FOH est qu'elles sont très fortement appuyées sur des analyses « sur le terrain » (entretiens, observations de chantiers, de situations de travail par exemple lors d'activités « sensibles », etc.) – qui, lorsque ces analyses sont menées dans le cadre d'expertises de sûreté, font l'objet de protocoles entre l'IRSN et l'exploitant. La nature même des sujets traités ainsi que les modalités spécifiques des évaluations menées donnent ainsi à l'IRSN une vue à la fois transverse et proche du terrain des pratiques d'intervention, d'organisation et de management mises en œuvre. Les études et recherches peuvent aussi s'appuyer sur des simulations – comme cela sera montré plus loin avec le *HALDEN Reactor Project*.

Les études et recherches sont menées avec des partenaires du monde universitaire, des organismes de recherche (le CNRS évoqué précédemment), avec éventuellement des industriels, et/ou dans le cadre de projets nationaux ou internationaux (tels par exemple que le projet HALDEN – voir le focus plus loin). En 2012, l'IRSN a créé, pour une durée de cinq ans et conjointement avec AREVA et DCNS²¹⁵, une chaire baptisée RESOH²¹⁶ en partenariat avec l'École de mines de Nantes ; cette chaire est consacrée au management de la sûreté des industries à risques, en particulier dans le domaine du nucléaire. Par ailleurs, l'Agence nationale de la recherche (ANR) a décidé de financer en 2013 le projet AGORAS²¹⁷ porté par les Écoles des mines de Paris et de Nantes ainsi que par le Centre de sociologie des organisations de Science-Po sur la gouvernance des risques et la gestion de crises.

214. En collaboration avec l'Université Paris 8 pour la première et l'hôpital La Pitié-Salpêtrière pour la seconde.

215. Entreprise de haute technologie des systèmes navals de défense.

216. Recherche en sûreté, organisation et hommes.

217. Amélioration de la gouvernance des organisations et des réseaux d'acteurs pour la sûreté nucléaire.

Nous présentons ci-après quelques-unes des études et recherches²¹⁸ les plus significatives impliquant l'IPSN puis l'IRSN, passées ou en cours. Comme nous le verrons, ces études et recherches visent fondamentalement, de par leur nature, à comprendre les mécanismes à l'œuvre dans les différentes activités impliquant l'homme et les organisations, pour en faire émerger autant que possible les « ressorts » d'intérêt pour la sûreté des installations nucléaires.

11.2. Les études et recherches relatives à la conception des salles de commande des réacteurs

11.2.1. La période post-TMI

A) Éléments de contexte

Les années 1970 ont été marquées par l'installation de systèmes de contrôle-commande centralisé dans la plupart des industries dites de « processus continu » : sidérurgie, pétrochimie, chimie fine, agroalimentaire, etc. Le programme nucléaire français a profité de ces développements technologiques. L'IPSN s'est alors trouvé confronté à la question de l'analyse de sûreté des salles de commande non seulement des réacteurs à eau sous pression du parc électronucléaire français (réacteurs de 900 et de 1 300 MWe), mais également du réacteur à neutrons rapides de la centrale de Creys-Malville (SUPERPHENIX) et des usines de La Hague.

La conception des salles de commande a fait émerger des questions diverses relatives au travail des « opérateurs de conduite ». Les industriels se sont interrogés ainsi sur ce que recouvre le travail de surveillance en salle de commande, sur les modalités de présentation des informations sur les pupitres situés en salle de commande, sur les échanges d'information entre les rondiers et les opérateurs situés en salle de commande, etc. Des chercheurs en ergonomie, spécialistes des « interfaces homme-machine » et des « interactions homme-système » se sont mobilisés, notamment en Europe, pour répondre à ces questions²¹⁹ ; leurs travaux influenceront et alimenteront les études et recherches de l'IPSN.

C'est dans ce contexte scientifique et technique qu'est survenu en 1979 l'accident de TMI, qui a montré que la conception des salles de commande des réacteurs nucléaires joue un rôle déterminant dans la maîtrise des accidents, tant sur le plan de leur prévention que sur celui de la limitation de leurs conséquences et de leur « récupération ». Lors de l'accident de TMI, une vanne de la ligne de décharge du pressuriseur qui s'était ouverte automatiquement pour limiter un pic de pression dans le circuit primaire reçoit un ordre de fermeture, mais ne se referme pas totalement. Or l'interface de conduite indique que cette vanne est fermée car elle prend comme information l'ordre de fermeture de la vanne et non

218. Dont des travaux de thèses.

219. Citons notamment : V. De Keyser en Belgique, L. Bainbridge en Grande-Bretagne, J. Rasmussen au Danemark, A. Wisner et F. Daniellou en France.

pas sa position réelle qui aurait pu être déterminée par un capteur de position. Cela nuit considérablement à la bonne perception de l'état de l'installation par l'équipe de conduite. Par ailleurs, l'arrêt d'urgence du réacteur et les problèmes affectant le circuit secondaire provoquent le déclenchement de multiples alarmes qui s'allument ou clignotent, conduisant à ce que les opérateurs ont appelé un « arbre de Noël ». En l'absence de hiérarchisation des informations affichées, l'équipe de conduite se trouve « noyée » et éprouve des difficultés pour percevoir et extraire les informations pertinentes.

Plusieurs actions d'amélioration des salles de commande des réacteurs de 900 et 1 300 MWe sont engagées par EDF à la suite de l'accident de TMI. Ces améliorations concernent les panneaux de conduite avec le regroupement, au sein de zones colorées, des commandes des équipements liés fonctionnellement, la délimitation de zones principales correspondant à des fonctions globales au sein desquelles sont délimitées des zones secondaires relatives à des sous-fonctions. Un panneau de sûreté destiné à la conduite des situations accidentelles est également introduit dans la salle de commande. D'autres améliorations concernent l'organisation de l'équipe de conduite, avec la création d'un ingénieur de sûreté-radioprotection (ISR) ayant pour fonction d'assurer, à partir d'une position de recul par rapport à l'équipe de conduite, une surveillance indépendante de la situation. À cet effet, l'ISR est en charge d'établir un diagnostic de l'état du réacteur (diagnostic par états), alors que l'équipe de conduite dispose de procédures orientées vers le diagnostic des événements. La logique d'organisation des procédures de conduite à appliquer en situation accidentelle évolue également (voir plus loin le paragraphe 11.2.2A).

En 1983, l'IPSN a engagé un travail d'étude dans deux directions, afin d'être en mesure d'analyser le plan d'amélioration d'EDF. D'une part, il procède à une synthèse des résultats des études et recherches menées sur la conduite des « processus continus » en vue de leur transposition dans le contexte nucléaire. D'autre part, il réalise une étude sur la base d'essais réalisés sur un simulateur de conduite, dans le cadre d'un accord quadripartite entre CEA-EDF-Framatome-Westinghouse. Les résultats de ces études seront mobilisés par l'IPSN pour formuler un avis sur le plan d'amélioration engagé par EDF.

B) Principaux enseignements issus des études et recherches concernant la conduite des « processus continus »

Au début des années 1980, un certain nombre d'études ont été réalisées sur l'activité des opérateurs en salle de commande de « processus continus » (raffineries, cimenteries, usines sidérurgiques). Il s'agit d'études qui concernent principalement la conduite en situation normale d'exploitation. Dans ses premiers rapports (internes) établis en 1983, l'IPSN synthétise les principaux résultats de ces études, dans l'objectif de sensibiliser les ingénieurs en charge des évaluations et des expertises de sûreté en matière d'interaction homme-machine pour les centrales nucléaires.

Ces études ont mis en évidence **le rôle central de l'anticipation dans l'activité de surveillance réalisée en salle de commande**. Ainsi, dans les industries de « processus continu » étudiées, il est apparu que les opérateurs de conduite n'attendent pas qu'une alarme ou un défaut apparaisse en salle de commande pour réagir, ils ne conduisent pas

« aux alarmes ». Ils cherchent à prévoir les évolutions physico-chimiques des procédés pour agir en amont de l'apparition des alarmes. Cette intervention des opérateurs joue un rôle de lissage des évolutions du procédé qui est bénéfique pour la qualité de la production, mais elle permet aussi de prévenir certains transitoires qui, s'ils ne présentent pas en eux-mêmes de risques, peuvent mettre en difficulté l'équipe de conduite, voire solliciter plus ou moins fortement les installations.

Ces études ont montré également que **la surveillance est une activité, qui est à la fois focalisée et globale**. Elle est focalisée, car les opérateurs doivent concentrer leur attention sur les actions qu'ils sont en train de réaliser pour éviter des erreurs, ils doivent orienter leur perception sur certaines parties des installations pour appréhender précisément certains phénomènes. Mais, dans le même temps, ils doivent maintenir une vue d'ensemble pour ne pas passer à côté de certains dysfonctionnements ou pour être en mesure de percevoir des évolutions globales du procédé.

Les études ont aussi révélé que la surveillance est une activité qui est orientée par la formation et par l'expérience. Il est couramment admis que les opérateurs vont surveiller de manière préférentielle les paramètres qui sont liés aux fonctions importantes pour la qualité de la production et pour la sûreté de l'exploitation. Les résultats des études viennent nuancer cette affirmation. En effet, les opérateurs intègrent leur expérience de la conduite et vont avoir tendance à surveiller préférentiellement les systèmes qui sont sujet à des dérèglements ou dysfonctionnements. De même, ils vont avoir tendance à interpréter prioritairement une évolution de paramètres observée en faisant référence aux évolutions de paramètres de même type auxquelles ils ont été confrontés antérieurement.

C) Le programme d'étude quadripartite CEA-EDF-Framatome-Westinghouse *Operator action*

Ce programme quadripartite a initialement eu pour objectif l'étude des « temps de réponse des opérateurs » en situation accidentelle simulée afin d'alimenter les évaluations probabilistes de sûreté (EPS). Toutefois, en 1981, EDF a décidé de compléter cette approche quantitative par une analyse qualitative des difficultés rencontrées par les opérateurs au cours des essais de simulation. Différents scénarios accidentels de référence pour les réacteurs à eau sous pression (grosse brèche du circuit primaire, rupture de tuyauterie de vapeur à l'intérieur de l'enceinte de confinement, rupture d'un tube de générateur de vapeur, etc.) ont ainsi été « joués » par des équipes de conduite sur le simulateur du centre de formation à la centrale du Bugey, en avril-mai 1982.

L'IPSN a procédé à sa propre analyse qualitative des données recueillies lors de ces essais de simulation. Celle-ci a mis en évidence que la phase de récupération de l'accident pose le plus de problèmes aux équipes de conduite. La gestion simultanée de plusieurs objectifs concurrents ou conflictuels est ainsi identifiée comme une source de difficultés. Les équipes qui parviennent le mieux à maîtriser ces difficultés sont celles qui disposent d'une bonne capacité d'anticipation de l'évolution des phénomènes physiques. Celle-ci leur permet notamment de ne pas se focaliser sur les variations instantanées des paramètres. En l'absence de cette anticipation, les équipes ont tendance à multiplier les prises d'information et les vérifications, ce qui conduit à un travail « haché » et à une

vision fragmentée de l'installation. La cohésion de l'équipe et la bonne coordination des activités de chacun de ses membres apparaissent également comme des facteurs qui peuvent favoriser le développement de la capacité d'anticipation.

Par ailleurs, à l'issue de l'analyse des essais de simulation, EDF et l'IPSN ont considéré qu'il était nécessaire de recueillir des données comportementales plus précises afin de mieux identifier les stratégies et les raisonnements des opérateurs. Si le recueil de données verbales lors d'entretiens menés à l'issue des essais ont été envisagés, l'IPSN a estimé qu'il était important de les coupler avec des données objectives. Ceci conduit à une étude de faisabilité de l'utilisation de l'oculographe²²⁰ comme moyen d'étude des stratégies d'exploration visuelle lors du travail en salle de commande.

11.2.2. *Le palier N4 : la première salle de commande informatisée*

A) De nouvelles interfaces, de nouvelles questions posées

À la suite de l'accident de TMI, EDF a décidé d'équiper son futur modèle de réacteur de 1 450 MWe (palier N4) d'une salle de commande informatisée. EDF souhaitait bénéficier des avancées de l'informatique qui permettent de filtrer et hiérarchiser les informations et de structurer leur présentation en salle de commande. Ainsi, ont fait leur apparition : un système de traitement et de hiérarchisation des alarmes, des séquences automatiques de conduite, des écrans permettant d'afficher des vues des installations suivant différentes logiques (vues par système, vues par fonction, etc.).

De même, EDF a décidé de modifier la conception des consignes de conduite incidentelle-accidentelle des réacteurs en adoptant le principe de l'approche par états (APE)²²¹. La conduite par états a pour objectif de caractériser l'état de fonctionnement du réacteur²²² et de le ramener progressivement dans un domaine de fonctionnement acceptable pour la sûreté, sans considération des événements qui sont à l'origine de la dégradation. Une « consigne APE » est un logigramme constitué principalement de questions auxquelles l'opérateur doit répondre par oui ou par non et qui indique les actions de conduite à réaliser. Pour les réacteurs du palier N4, ces consignes sont informatisées. L'opérateur parcourt les « pas » de l'image logigramme à l'aide d'une boule roulante et des flèches du clavier. Sur cette image sont affichées les informations dont l'opérateur a besoin pour parcourir la consigne (valeurs de paramètres, extraits de schémas de circuits, etc.). Sur un second écran, l'opérateur dispose d'une image « tableau de bord » sur laquelle figurent les paramètres de conduite essentiels. Sur un troisième écran, l'opérateur a la possibilité d'afficher des vues plus détaillées de circuits, de systèmes, ou de paramètres (diagramme pression/température par exemple) à partir desquelles il peut effectuer des réglages. Un certain nombre de « pas » du logigramme sont contrôlés par la consigne informatisée. La consigne compare la réponse donnée par

220. Suivi du regard des opérateurs.

221. Voir l'ouvrage « Éléments de sûreté nucléaire » de J. Libmann, chapitre 14 – IPSN/Les éditions de la physique (1996).

222. Le terme « procédé » est aussi couramment utilisé.

l'opérateur à la réponse calculée par le système informatique de conduite à partir des données fournies par les capteurs. En cas d'écart, le lien avec le pas précédent du logigramme s'affiche en rouge. Il s'agit d'un contrôle *a posteriori*, dont l'opérateur peut accepter ou refuser la prise en compte, on dira alors qu'il « force le pas ». De plus, la plupart des consignes sont surveillées par le système informatique qui s'assure périodiquement que les réponses données par l'opérateur lors du parcours de la consigne sont toujours valides par rapport à l'évolution des paramètres. Dans le cas où une réponse n'est plus valide, le système alerte l'opérateur et lui permet d'accéder directement au pas concerné.

L'impact de ces nouveaux dispositifs de conduite sur l'activité des opérateurs pose de nouvelles questions. Afin de valider ses choix de conception, EDF s'est doté d'un « simulateur pleine échelle » constitué d'une maquette de la future salle de commande couplée à un simulateur du « procédé », permettant à des équipes de « jouer » la conduite de scénarios. Plusieurs dizaines d'essais seront réalisés dans le cadre de campagnes qui se déroulent entre 1987 et 1996. Ces campagnes successives permettent d'évaluer, au fur et à mesure de l'avancement de la conception, l'adéquation de la salle de commande aux exigences de l'activité de l'équipe de conduite. La conduite en situation normale est évaluée lors des deux premières campagnes d'essais, la conduite incidentelle-accidentelle étant évaluée en 1994–1995 lorsque les consignes de conduite informatisées sont développées.

Si les connaissances acquises par l'IPSN à travers les études mentionnées précédemment lui permettent d'évaluer la conduite en situation normale, l'informatisation des consignes de conduite incidentelle-accidentelle soulève de nouvelles questions et amène l'IPSN à engager une nouvelle recherche.

B) Étude du guidage des opérateurs en situation incidentelle-accidentelle

Les campagnes d'essais sur simulateur menées par EDF en 1994–1995 ont eu pour objectif de valider l'utilisation des consignes informatisées. Il s'agit de s'assurer que les moyens mis à la disposition des opérateurs leur permettent de conduire l'installation dans des conditions acceptables pour la sûreté, notamment en situation accidentelle. Cette orientation se traduit par une attention particulière portée à la performance des opérateurs, c'est-à-dire à la pertinence des actions de conduite qu'ils réalisent. À l'issue des essais, l'IPSN a considéré qu'il était nécessaire de mieux comprendre la manière dont cette performance est produite par les opérateurs en étudiant leur activité cognitive (perceptions, interprétations, raisonnements, etc.) :

- Sur quelle base l'opérateur identifie-t-il un écart ?
- Comment l'opérateur construit-il sa vision de l'évolution de l'état de fonctionnement du réacteur ?
- Comment appréhende-t-il la manière dont la procédure construit sa « propre vision » de cette évolution ?
- Comment l'opérateur fait-il appel à l'équipe de conduite pour conforter son jugement ?

L'IPSN a disposé des données recueillies lors de plusieurs essais qu'il a pu suivre et décida d'engager leur analyse, en collaboration avec des chercheurs du CNRS. Ces données ont été constituées :

- d'enregistrements des paramètres de l'installation donnés par le simulateur ;
- d'enregistrements audio des essais (alarmes, échanges d'informations verbales ou téléphoniques, ordres, etc.), appuyés sur les touches de claviers, qui permettaient de repérer la progression d'un opérateur dans les « pas » d'une consigne informatisée, dialogues privés qui permettait notamment de repérer des confusions ou des hésitations, etc. ;
- d'enregistrements vidéo ;
- de commentaires de deux experts de la conduite, l'un possédant une large expérience de la conduite dans les salles de commande non informatisées et de la conduite incidentelle/accidentelle sur simulateur, l'autre possédant une solide expertise technique des procédures informatisées.

Cette recherche a permis de mieux comprendre l'impact du guidage « pas à pas » de l'opérateur par les consignes [11]. Compte tenu du caractère inacceptable de certaines actions inappropriées de l'opérateur, il peut sembler pertinent de développer un guidage qui prescrit le plus totalement possible à l'opérateur les actions qu'il doit réaliser. Les « consignes APE » informatisées apparaissent avoir été conçues suivant cette logique. En effet, leur conception vise à décomposer au maximum l'activité de conduite, tant en ce qui concerne le diagnostic qu'en ce qui concerne les actions de conduite proprement dite. L'horizon de chaque action est fortement cadré par les « pas » de la consigne, qui contraignent l'opérateur à une conduite « pas à pas ».

L'analyse détaillée de l'activité mise en œuvre par l'opérateur pour élaborer la réponse à un « pas » de la consigne révèle qu'il est amené à mettre en œuvre de multiples compétences qui ne sont pas explicitées par la consigne. La mise en œuvre de ces compétences par l'opérateur suppose qu'il ait été formé. Cependant, le domaine de compétences est tellement vaste qu'il est illusoire de penser que l'opérateur pourra un jour tout connaître. De plus, certaines de ces compétences sont spécifiquement liées à la conduite des situations accidentelles, elles ne seront mises en œuvre que très rarement. Pour dépasser ces difficultés, la forme du guidage doit aider les opérateurs à mobiliser leurs compétences lorsqu'ils sont engagés dans le parcours de la consigne.

L'étude montre que la visualisation de la structure d'ensemble de la procédure contribue à la compréhension de la logique de la conduite en cours et favorise la mobilisation des compétences. En effet, l'interprétation d'un « pas » nécessite presque toujours d'intégrer l'interprétation des « pas » précédents. De même, la pertinence de l'interprétation du « pas » sera renforcée si l'opérateur peut visualiser les cheminements qui découleront de son choix. Inversement, un strict suivi « pas à pas » de la consigne favorise un enfermement de l'opérateur qui semble conduire à une forme de retrait et de passivité de sa part, celui-ci éprouvant alors parfois des difficultés à reprendre l'initiative lorsque cela serait nécessaire. Lorsqu'il est en position de suivi passif de la consigne, l'opérateur n'est pas en mesure de mobiliser efficacement ses compétences.

Ces observations rejoignent les résultats de deux études menées dans d'autres secteurs industriels. Une étude de 1987 [12] portant sur l'interaction avec un système expert d'aide au diagnostic en maintenance montre que l'interaction aboutit à des résultats inadaptés si l'opérateur suit passivement les recommandations du système sans construire lui-même en parallèle son propre diagnostic. De même, dans le domaine de l'aéronautique, l'ouvrage [13] paru en 1996 cite une étude expérimentale de l'interaction avec un système d'aide à la planification du vol, qui fait apparaître que « *les pilotes se laissent influencer par le système et perdent une certaine aptitude à la critique, acceptant des choix contre-logiques qu'ils n'auraient jamais envisagés* ». Pour que le guidage soit efficace, il faut réussir à mieux prendre en compte la nécessité d'un engagement actif de l'opérateur dans la conduite. Le guidage doit donc permettre à l'opérateur d'établir une certaine distance par rapport aux prescriptions de la consigne.

Cette recherche permet également de mieux comprendre le **positionnement de l'opérateur confronté à un guidage qui lui paraît inadapté**.

Ces écarts entre le point de vue de l'opérateur et le « point de vue » de la consigne surviennent dans différentes situations : prise en compte par l'opérateur de la tendance d'évolution de l'état de fonctionnement du réacteur, alors que le « pas » de la consigne porte sur son état instantané, difficulté à adopter une conduite prescrite par la consigne mais qui apparaît non optimisée, difficulté à respecter l'ordre de réalisation des actions prescrit par la consigne alors qu'une action est perçue comme urgente, etc. Ces écarts de point de vue entre l'opérateur et la consigne traduisent la position active de l'opérateur par rapport aux prescriptions, ils manifestent sa capacité à résister aux effets d'enfermement produits par le type de guidage « pas à pas » des consignes abordées dans le paragraphe qui précède. Ils peuvent jouer un rôle positif pour l'opérateur, car ils constituent des occasions de vérifier le bien-fondé de son interprétation de l'évolution de l'état de fonctionnement du réacteur.

Lorsque l'opérateur perçoit l'émergence d'un écart entre son point de vue sur l'évolution du « procédé » et le point de vue de la consigne, deux dénouements possibles sont observés : soit l'opérateur dépasse l'écart de point de vue et poursuit le parcours de la consigne, soit il décroche du guidage, au risque de se retrouver totalement désorienté.

Le dépassement de l'écart a lieu lorsque l'opérateur prend en compte des éléments d'information complémentaires qui lui permettent de comprendre la logique de l'écart. Dès lors, l'écart devient compréhensible et l'opérateur peut en accepter l'existence, au moins pendant un certain laps de temps. Par exemple, un opérateur souhaite réaliser une action de conduite, alors que la consigne ne lui demande pas. Cet écart de points de vue pourra ainsi être dépassé si l'opérateur constate que l'action en question est traitée par la consigne quelques « pas » plus tard dans le logigramme. L'opérateur peut également dépasser l'écart de point de vue, sans en comprendre la logique, mais à condition de juger acceptable la poursuite du parcours de la consigne. Cette acceptabilité va en partie dépendre de l'opposition qui peut apparaître entre l'action prescrite et les connaissances de l'opérateur. Mais le fait que la consigne amène l'opérateur à aller à l'encontre de ses connaissances, à les mettre entre parenthèses, peut entraîner une perte de crédibilité de la consigne ou encourager un positionnement passif de l'opérateur par rapport à la consigne, dont les effets négatifs ont été présentés dans le paragraphe qui précède.

11.2.3. Le projet EPR : vers une automatisation renforcée

A) Les principes de conception

Comme pour le palier N4, EDF a choisi d'équiper la salle de commande de l'EPR d'un système numérique de contrôle-commande piloté par une interface homme-machine informatisée. Dès l'origine, le projet prévoit également une automatisation renforcée qui doit notamment contribuer à réduire le volume des actions réalisées par les opérateurs de conduite et alléger leur charge de travail, instaurer des lignes de défense à l'égard d'actions inappropriées de leur part.

Cette automatisation concerne des séquences de démarrage et d'arrêt de matériels (e.g. connexion automatique du système de refroidissement à l'arrêt en conduite normale), l'introduction de nouvelles régulations (e.g. relatives aux systèmes d'alimentation auxiliaire des générateurs de vapeur à l'arrêt, d'appoint d'eau et de bore), de nouvelles fonctions d'aide à l'opérateur ayant pour objectif d'introduire des actions correctives automatiques afin d'éviter la sollicitation du système de protection du réacteur. De plus, un diagnostic automatique (DA) d'état du réacteur est introduit pour aider la conduite incidentelle et accidentelle. Il s'agit d'un dispositif de surveillance de l'installation qui, à partir de l'état des principaux paramètres relatifs à l'état du réacteur et des circuits primaire et secondaire, propose à l'équipe de conduite la stratégie de conduite à appliquer en conduite accidentelle.

Compte tenu de ces orientations, l'IPSN a réalisé une revue de la littérature dès 1995 afin de faire le point des travaux traitant des interactions hommes-automates. Ce travail a permis de caractériser deux approches de l'automatisation. Dans une approche « technique », l'automatisation constitue une solution privilégiée pour réduire les interventions des opérateurs et limiter ainsi les risques d'erreur humaine. L'opérateur assure alors un ensemble de fonctions résiduelles dont la définition est souvent imprécise, ce qui peut nuire à l'efficacité globale du système homme-machine. Une approche alternative consiste à envisager l'automatisation comme un outil au service de la performance des opérateurs. Il est alors nécessaire de concevoir des automates qui soient compatibles avec les caractéristiques de l'activité humaine (perception, raisonnement, coopération et interaction, etc.). Cette approche « centrée sur l'activité » remet en cause l'automatisation systématique à partir de l'analyse de ses impacts négatifs sur cette activité.

Cette revue de la littérature a permis également d'identifier des thèmes à approfondir concernant l'impact du niveau d'automatisation sur la maîtrise de la conduite d'un « procédé » par l'équipe de conduite, la capacité d'acquisition de connaissances à travers l'expérience de conduite, les modes de coopération entre les membres de l'équipe de conduite, le niveau de confiance dans les automatismes, le degré d'autonomie et l'implication des opérateurs dans la conduite.

B) Étude de l'impact de l'automatisation sur la performance de l'opérateur

L'IPSN a mené de 1996 à 1998 un projet de recherche au Halden Man-Machine Laboratory (HAMMLAB) situé en Norvège – laboratoire rattaché au *HALDEN Reactor*

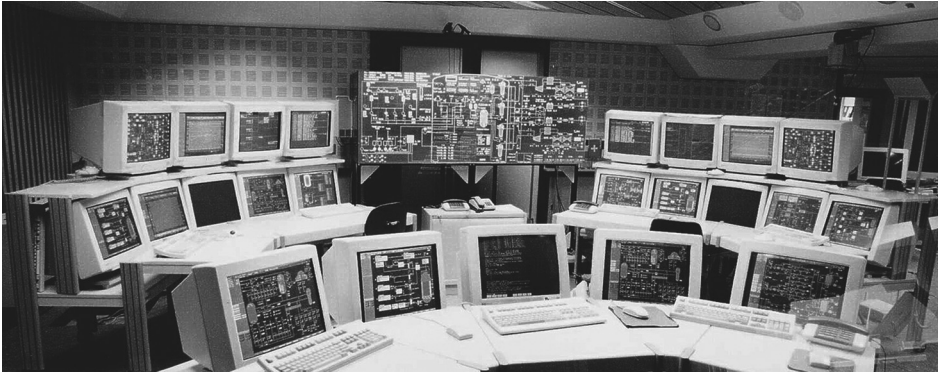


Figure 11.1. L'installation au HAMMLAB durant l'expérimentation de l'IPSN. © DR.

Project (voir le focus plus loin) – concernant l'impact de l'automatisation sur les performances des opérateurs (figure 11.1). Ce travail a été mené avec le Nokia Research Simulator (NORS) de ce laboratoire (adaptation PWR²²³ d'un VVER 440).

Le projet de recherche avait pour objectif de comprendre comment les opérateurs intègrent les effets des actions des automatismes lorsqu'ils gèrent une situation et qu'ils doivent prévoir son évolution. Pour répondre à cette question, une expérimentation a été organisée dans le HAMMLAB, en prenant en compte le type d'automatisation (« étendu » *versus* « limité ») et le type d'activité de conduite (diagnostic ou séquence opératoire). Les situations de diagnostic se caractérisaient par leur détérioration progressive, les opérateurs disposant d'une certaine marge de manœuvre et devant anticiper les évolutions futures. Les séquences opératoires devaient être réalisées manuellement ou automatiquement, pour atteindre un changement d'état. Six scénarios d'environ une heure ont été joués par six équipes de conduite.

Dans une perspective d'analyse quantitative, plusieurs variables indépendantes ont été mesurées au cours des essais, par exemple :

- mesure de la performance globale (équipe + automates) à partir de l'atteinte de certaines valeurs de paramètres spécifiques du réacteur ;
- mesure de la performance des opérateurs sur des fenêtres temporelles prédéfinies pour chaque scénario, qui vont de l'apparition d'un signal annonçant un défaut jusqu'à la réalisation d'une action en réponse par l'équipe de conduite ;
- mesure de la « conscience de la situation » (*situation-awareness*) à travers les réponses fournies par les opérateurs à un questionnaire sur les valeurs de certains paramètres. Le questionnaire est présenté à plusieurs reprises au cours d'un essai, alors que le simulateur est « mis sur pause » ;
- mesure de la confiance dans les systèmes automatiques à travers les réponses à un questionnaire proposé à la fin de chaque essai.

223. *Pressurized Water Reactor.*

Un certain nombre de résultats sont ressortis de l'analyse des essais, par exemple :

- dans les situations de diagnostic, les opérateurs ont tendance à faire davantage confiance aux automatismes lorsqu'ils ont un périmètre d'action limité ;
- dans les situations de type « séquence opératoire », l'automatisation étendue permet une meilleure performance globale tout en réduisant la charge de travail des opérateurs ;
- l'intervention de l'homme resterait souhaitable dans les situations de type diagnostic complexe car dans ce cas l'automatisation « étendue » ne permet pas d'obtenir une bonne performance globale.

#FOCUS.....

Le HALDEN Reactor Project

Le *HALDEN Reactor Project* a été créé en 1958 sous l'égide de l'OCDE/AEN (<https://www.oecd-nea.org/jointproj/halden.html>). C'est l'Institute for Energy Technology (IFE) en Norvège qui accueille ce projet, regroupant 19 pays membres qui financent des travaux de recherche dans des domaines tels que le combustible

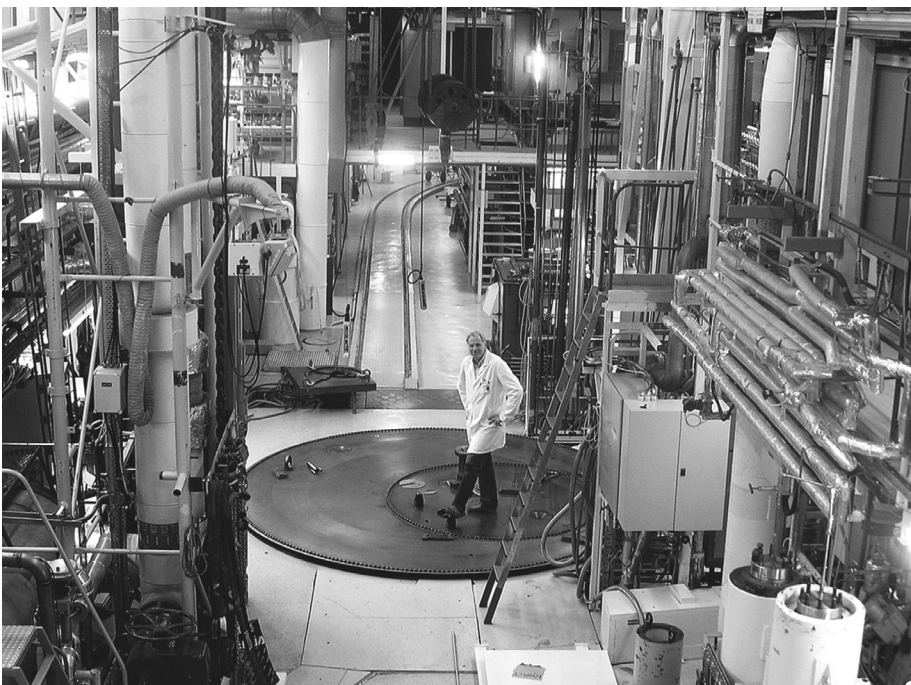


Figure 11.2. Vue du hall du réacteur HALDEN. © IFE (Institutt for energiteknikk).

nucléaire, le comportement de matériaux dans un environnement nucléaire, les facteurs organisationnels et humains, les interfaces homme-machine, etc. Certains de ces travaux sont menés en tirant directement profit d'un petit réacteur d'expérimentation de 20 MW (le *HALDEN Reactor* — réacteur de type bouillant modéré à l'eau lourde [figure 11.2]), accueillant régulièrement une trentaine de dispositifs expérimentaux de façon simultanée. En matière de facteurs organisationnels et humains, les travaux s'appuient sur des simulations faites au sein du Halden Man-Machine Laboratory (HAMMLAB).

11.2.4. *Apports et perspectives*

Les connaissances acquises au travers de ces recherches ont constitué autant de « points d'attention » pour les expertises de l'IPSN. Ainsi, il a été considéré que la création de la fonction d'ingénieur sûreté-radioprotection (ISR) décidée par EDF devait permettre de limiter les effets de focalisation, voire d'enfermement, entraînés par les situations imprévues, effets dont l'importance a été mise en évidence par les études. Second exemple, l'IPSN a estimé que l'intégration de points de coordination dans les consignes de conduite accidentelle devrait contrebalancer le risque de fragmentation de l'équipe de conduite lorsqu'elle est confrontée à des situations imprévues à fort enjeu. De même, les résultats de l'étude sur l'utilisation des consignes informatisées ont été mobilisés par l'IRSN dans son évaluation de la salle de commande de l'EPR, notamment pour souligner l'importance de fournir aux opérateurs une vue d'ensemble de la consigne en cours d'application afin de leur permettre de comprendre la stratégie de conduite.

Ces études et recherches sur les activités de conduite des réacteurs doivent être poursuivies, compte tenu de l'évolution continue des technologies qui permet d'offrir de nouvelles fonctionnalités aux équipes de conduite. Citons le développement de « systèmes embarqués » qui vont permettre aux intervenants de terrain de disposer en local de multiples informations sur l'état des systèmes et qui pourront transmettre aux opérateurs en salle de commande des informations beaucoup plus précises sur la réalité du terrain.

Elles doivent également être poursuivies pour tirer les enseignements de l'accident survenu à la centrale de Fukushima Daiichi. À cet égard, l'IRSN a engagé une étude approfondie de l'ensemble des rapports officiels et des témoignages qui ont été publiés sur l'accident de Fukushima et a établi un rapport intitulé *A Human and Organizational Factors Perspective on the Fukushima Nuclear Accident* [14]. Ce rapport a souligné certaines conséquences d'une perte totale de l'alimentation électrique de la salle de commande : « À 15h37, la salle de commande [des réacteurs 1 et 2] perd toutes ses alimentations électriques. Elle est brusquement plongée dans le silence et l'obscurité. Les opérateurs utilisent des lampes torches pour lire les manuels des procédures d'urgence. Cependant ces procédures ne sont d'aucun secours pour gérer le réacteur nucléaire puisque les indicateurs qui permettent d'en surveiller le fonctionnement sont hors service. Il devient impossible de contrôler les paramètres essentiels au refroidissement du réacteur :

le niveau d'eau, la pression de la cuve et celle de l'enceinte ». Cette étude a permis également d'identifier des questions à approfondir, par exemple : quels savoirs doivent être mobilisés pour collecter des informations sur l'état des systèmes et les interpréter, lorsque les indicateurs et procédures deviennent inopérants suite à la perte totale d'alimentation de la salle de commande ? Comment maintenir une réelle coopération entre la salle de commande et le centre local de crise, lorsque les moyens de communication ne sont plus opérationnels ?

11.3. Les études et recherches relatives à l'organisation et au management de la sûreté des centrales d'EDF

Il faut attendre le début des années 1990 pour que l'IPSN engage une première étude consacrée à l'organisation de l'exploitation des réacteurs (facteurs humains et organisation de l'arrêt de tranche²²⁴, voir le paragraphe 11.3.1), les études précédentes se focalisant sur les équipes de conduite et la conception des salles de commande. L'émergence de questions liées à la sûreté des opérations de maintenance joue un rôle d'initiateur de ces études des organisations. Mais ces études bénéficient également des travaux engagés suite à l'accident de TMI par des sociologues américains sur la fiabilité organisationnelle.

Ainsi, un livre publié en 1984 [15] et au titre choc, *Normal accident, living with high risk technology*, dans lequel est présentée une analyse approfondie de plusieurs accidents industriels, dont l'accident de TMI, utilise le terme « accident normal » pour souligner que les accidents sont liés à la nature même des systèmes à risques. L'ajout de protection conduit dans les faits à un accroissement de leur complexité qui augmente les possibilités de défaillance et réduit la capacité des acteurs à comprendre leur fonctionnement global, augmentant ainsi en retour la vulnérabilité de ces systèmes. De plus, les composants de ces organisations complexes sont fortement couplés ; ce qui affecte un composant pourra également affecter ceux qui lui sont liés.

Parallèlement, d'autres chercheurs estiment que le point de vue exprimé dans cet ouvrage [15] n'est pas confirmé par l'observation de la réalité des accidents affectant les systèmes à risques qui restent très rares. Ils cherchent donc à comprendre comment les industries à « hauts risques » parviennent à maintenir un niveau de fiabilité élevé. Un groupe de chercheurs de l'Université de Californie (Berkeley)²²⁵ va donner naissance au courant des HRO (*High Reliability Organizations*). Leurs travaux rendent compte des dispositions organisationnelles et manières de faire, mises en œuvre au quotidien dans ces HRO, afin de maintenir une haute fiabilité. Ils soulignent le rôle positif joué notamment par la flexibilité organisationnelle, c'est-à-dire la possibilité de mobiliser

224. Terme utilisé pour désigner les arrêts des réacteurs du parc électronucléaire pendant lesquels sont notamment réalisés le rechargement d'assemblages de combustible et des opérations de maintenance.

225. Todd La Porte, Karlene Roberts et Gene Rochlin, auxquels s'ajoutent notamment Paul Shulman et Karl Weick.

plusieurs registres de fonctionnement de l'organisation en fonction de la situation, la redondance du contrôle exercé par les acteurs, l'existence d'une cohérence forte entre les objectifs de l'organisation et les buts poursuivis par les acteurs qui la composent, la reconnaissance de l'importance des compétences des acteurs quel que soit leur niveau hiérarchique et l'organisation permanente d'entraînements et de recyclages, la co-existence d'une centralisation du pouvoir de décision et d'une décentralisation des décisions opérationnelles.

Dans la décennie 1980, ces travaux restent peu connus en France. C'est en 1999 une thèse, intitulée « Le nucléaire à l'épreuve de l'organisation » [16], qui contribuera à leur diffusion, en soulignant également leurs limites et en proposant de nouveaux développements.

Il convient par ailleurs de citer les travaux d'une sociologue américaine, Diane Vaughan, concernant l'accident de la navette Challenger, publiés en 1996 dans le livre [17] *The Challenger launch decision, risky technology, culture and deviance at NASA*. Ce travail articule plusieurs niveaux d'analyse de l'organisation, associés à différents emports temporels. Il s'intéresse ainsi aux interactions entre ingénieurs dans les heures qui ont précédé le lancement de la navette, et il considère également la dynamique des relations entre la NASA et le gouvernement américain sur plusieurs années. En s'intéressant aux micro-décisions, l'auteur montre comment ce qui peut apparaître rétrospectivement comme une série d'erreurs clairement identifiables est en réalité une succession de décisions et interprétations qui sont parfaitement compréhensibles dans le contexte dans lequel elles ont été élaborées, mais constituent des micro-écarts aux limites habituelles et conduisent insensiblement à une « normalisation de la déviance ». Ceci constitue un des apports majeurs de cette recherche.

Est aussi à mentionner le travail de thèse « Quand les concepteurs anticipent l'organisation pour maîtriser les risques : deux projets de modifications d'installations sur deux sites classés Seveso 2 » achevé en 2008 [18]. Ce travail, aux multiples enseignements – de nature sociologique – qui ne sauraient être tous développés ici, a fait émerger ou a confirmé quelques « ressorts » à partir desquels se construit la fiabilité de l'organisation :

- l'implication, dès la phase de conception de modifications d'installations, des opérateurs (de tous les métiers concernés) et des intervenants externes (par exemple les sous-traitants pour des travaux de maintenance) qui contribueront tous, *in fine*, à l'exploitation des installations modifiées, est un facteur de succès ;
- les corrections ou les ajouts dans les conceptions initiales des installations constituent une source de risques dans les systèmes complexes (comme l'est un réacteur nucléaire et son exploitation).

L'ensemble de ces travaux influenceront les études et recherches menées par l'IPSN puis l'IRSN développés ci-après.

11.3.1. L'organisation des activités de maintenance

À l'été 1989, trois incidents surviennent au cours d'interventions de maintenance sur des réacteurs du parc électronucléaire, soulignant qu'une action élémentaire oubliée ou

erronée lors de ces interventions peut compromettre la sûreté (rejet gazeux au-dessus du seuil limite, défaut latent qui aurait rendu indisponible un système de sauvegarde en cas de séquence accidentelle). Dès 1990, EDF renforce son organisation : création de nouveaux métiers (les contrôleurs et les chargés d'affaire), renforcement de l'ingénierie de site et de la préparation, formation des prestataires à la qualité et la sûreté, introduction d'une analyse de risque préalable à toute intervention. Si, sur le principe, ces mesures apparaissent de nature à renforcer la fiabilité des interventions de maintenance, l'IPSN et EDF conviennent qu'il est nécessaire d'approfondir la connaissance des conditions de réalisation des arrêts de tranche pour mieux évaluer la pertinence de ces mesures.

A) L'étude « Facteurs humains et organisation des arrêts de tranche : enjeux pour la sûreté »

Une étude a été engagée en 1991 par l'IPSN afin de comprendre le travail de maintenance, pour pouvoir évaluer les transformations d'organisation proposées par l'exploitant. L'étude a consisté à mettre en œuvre une analyse ergonomique de l'activité des différents acteurs au cours de deux arrêts de tranche d'un même site, en juillet 1992 et juillet 1993. Concrètement, des chantiers (plus d'une vingtaine, essentiellement liés à des travaux de mécanique) et l'activité de plus de 50 personnes de profils différents sont suivis dans le détail. La réalisation de deux essais de requalification d'équipements, parmi les plus complexes, est observée, concernant le circuit d'injection de sécurité. Chaque jour, un ergonome participe aux réunions d'arrêt durant lesquelles l'état d'avancement du travail de maintenance est contrôlé et l'ordonnancement des interventions ré-agencé. Cette analyse ergonomique permet, d'une part de mettre en évidence les spécificités du travail de chaque acteur, ses contraintes propres et les risques qui y sont associés, d'autre part de décrire comment les acteurs s'organisent en fonction des contingences qu'ils rencontrent dans le cadre organisationnel fixé. Ces deux aspects permettent d'identifier à la fois les possibilités de dysfonctionnement dans l'organisation et dans le travail individuel, ainsi que les stratégies implicites et les compétences développées par les acteurs pour minimiser ces risques de dysfonctionnement.

Cette étude a révélé la **prise en compte insuffisante des conditions de réalisation des interventions** lors de leur préparation et lors de l'élaboration du retour d'expérience des arrêts de tranche. La faible interaction entre intervenants prestataires et préparateurs a été identifiée comme un facteur qui contribue à cette situation. L'information liée aux difficultés des conditions de réalisation du travail ne « remonte » pas, bien que ces difficultés engendrent des aléas, des pertes de temps, des prises de décisions par les intervenants, qui ont un « coût » sur le plan humain et peuvent avoir des conséquences pour la sûreté.

Le traitement des aléas occupe une place centrale dans le travail des intervenants. Ce qui arrive n'est jamais exactement ce qui a été prévu, et des événements imprévus surgissent. Il faut les détecter, construire la suite des interventions d'une manière quelque peu différente de celle qui a été prévue et apprécier en temps réel l'impact sur la sûreté du réagencement des actions. Le temps et les moyens nécessaires à ce type de travail sont souvent sous-évalués.

L'étude a mis aussi en évidence que l'ensemble des interventions réalisées au cours d'un arrêt mobilisent des métiers et des compétences de nature différente. Les **confrontations de point de vue** en temps réel contribuent, lorsqu'elles sont organisées, au bon déroulement des interventions. Dans cette optique, la gestion des compétences des acteurs et des contraintes temporelles, l'attention à la collaboration entre les différents acteurs, et l'établissement de structures où peuvent se discuter ouvertement les limites rencontrées dans les conditions d'intervention sont des éléments importants pour la sûreté.

B) L'étude « L'organisation d'arrêts de tranche en temps de réforme »

En 1994, une étude du Centre de sociologie des organisations (CSO) intitulée « L'organisation d'arrêts de tranche en temps de réforme » a été réalisée dans le cadre de la préparation d'une thèse en sociologie (cofinancée par l'IPSN) portant sur l'organisation du travail dans les systèmes à risques – étude qui trouvera ensuite un écho dans l'ouvrage de 1999 cité en référence [16]. Cette recherche s'est appuyée sur une analyse comparative de la préparation et de la réalisation de quatre arrêts de tranches dans deux centrales américaines et deux centrales françaises.

L'objectif principal de l'étude était de prendre la mesure des changements amorcés par EDF à partir de 1991, visant à renforcer son organisation des activités de maintenance réalisées en arrêt de tranche. L'étude a cherché à identifier les difficultés rencontrées au cours de l'arrêt, mais elle a dépassé et renouvelé le cadre d'analyse de l'étude précédente (évoquée au paragraphe A). D'une part, l'étude a cherché à comprendre comment un certain nombre de contraintes de réalisation de l'arrêt sont produites lors de la préparation de celui-ci. D'autre part, elle a cherché à comprendre comment certaines caractéristiques des situations d'intervention sont liées à des contraintes globales qui pèsent sur les sites nucléaires. Sur le plan méthodologique, la recherche a mobilisé l'« analyse stratégique » développée en sociologie des organisations (voir par exemple l'ouvrage cité en référence [19]). L'analyse a consisté à mobiliser les données recueillies au cours d'entretiens (68 entretiens ont été réalisés) pour remonter aux « jeux » qui se déroulent entre les membres d'une organisation et aux stratégies qu'ils mettent en œuvre pour réaliser leurs activités et atteindre leurs objectifs.

Cette étude a révélé que la **mise en place d'une organisation de projet** (« structure permanente d'arrêt de tranche ») dédiée à la réalisation des arrêts de tranche génère des progrès dans la préparation des interventions de maintenance. Cependant, si l'équipe de projet est constituée environ six mois avant un arrêt, chaque service détache ses représentants progressivement et certaines personnes arrivent tardivement, comme les chargés de contrôle. De plus, ce sont les services qui choisissent les personnes qu'ils détachent auprès de l'équipe de projet, le chef d'arrêt ne choisit donc pas « ses troupes ». Dans le même temps, l'étude a mis en évidence que la « montée en puissance » de la structure d'arrêt s'accompagne d'un désengagement des services dans la préparation des arrêts. De manière diffuse, il est apparu que les services ne se sentaient pas très concernés par les affaires de l'arrêt, considérant qu'elles sont uniquement du ressort des hommes de l'arrêt.

Une autre évolution marquante observée sur le site concerne **les modalités de contractualisation avec les entreprises prestataires**. Les acheteurs viennent participer à l'élaboration des commandes de prestation et la dimension commerciale (définition des exigences techniques, mise en concurrence, etc.) occupe désormais une place beaucoup plus importante. L'exigence de précision dans les cahiers des charges soulève des difficultés pour les acteurs EDF qui manquent d'expérience ou qui sont confrontés à des opérations dont il est difficile d'anticiper les conditions de déroulement. Par ailleurs, si la mise en concurrence peut contribuer à une maîtrise des coûts de maintenance, elle introduit une instabilité des interlocuteurs techniques, avec la possibilité de devoir travailler avec des intervenants non connus, dont la compétence reste à apprécier en temps réel.

L'étude a également révélé la complexité des niveaux de **planification des interventions réalisées au cours d'un arrêt**. Le planning global de l'arrêt fait l'objet d'une première prévision sur la base des programmes de maintenance préventive, des lots de modifications à implanter, des contraintes liées à la mise à disposition de certains outillages, etc. Sur cette base, les chargés d'affaire définissent les affaires et lancent les commandes correspondantes auprès des entreprises prestataires. La préparation a lieu essentiellement par affaire, avec une coordination d'ensemble relativement limitée. Ceci conduit à une prise en compte insuffisante des activités transverses de type approvisionnement en pièces de rechanges ou en matériel courant de radioprotection.

C) L'étude de la mise en œuvre des « Centres opérationnels de pilotage des arrêts de tranche »

EDF a mis en œuvre depuis 2012 une nouvelle organisation du pilotage des arrêts de tranche, prenant appui sur des Centres opérationnels de pilotage des arrêts de tranche (COPAT), inspirée des pratiques nord-américaines (sous le nom de *Outage Control Centers* ou OCC). La mise en œuvre de cette nouvelle organisation a conduit au préalable l'IRSN à mener, au mois de juin 2011, une étude (benchmark) pour évaluer l'impact de cette évolution sur le management de la sûreté et de la radioprotection, sur la base d'une consultation d'exploitants de centrales nucléaires des États-Unis et du Canada, ainsi que de l'autorité de sûreté nucléaire du Canada (CNSC). EDF avait mené en 2007 sa propre étude.

Les COPAT ont été conçus dans l'optique de mieux respecter la durée prévisionnelle des arrêts de tranche, en assurant un pilotage en continu (24h/24h) des activités durant ces arrêts. Les phases et enchaînements sensibles d'activités critiques, repérés dès la préparation, font l'objet d'une surveillance particulière. Tout écart probable ou avéré de 30 minutes sur le chemin critique fait l'objet d'une alerte au Centre, lequel prend toute disposition pour traiter l'aléa sans impact sur le déroulement de l'arrêt. Cet accompagnement doit permettre de résoudre plus rapidement une difficulté rencontrée sur un chantier et de partager en temps réel des informations entre équipes. Cette organisation nécessite de disposer d'équipes d'intervention réactives. L'objectif est de pouvoir être en anticipation par rapport aux difficultés potentielles qui pourraient survenir et d'imaginer des scénarii pour y faire face, en prévoyant, par exemple et en conséquence, les moyens nécessaires et suffisants.

L'étude menée par l'IRSN a permis de capitaliser des faits, des constats et des enseignements, en particulier sur les paramètres clefs de succès, les limites et les enjeux de la gestion des arrêts de tranche fondée sur des OCC. Elle avait plus pour objectif de cerner les problématiques importantes que de recueillir des solutions d'organisation. Cette étude a ainsi contribué à l'élaboration d'une méthode d'expertise de la proposition d'EDF de mise en œuvre des Centres opérationnels de pilotage des arrêts de tranche. Si elle a validé un certain nombre de sujets à approfondir déjà identifiés par l'IRSN avant la réalisation de l'étude (complexité de la gestion des interfaces entre des centaines d'acteurs et au sein de projets comportant des milliers d'activités, anticipation en termes de ressources humaines dans une phase de départs massifs en retraite, intégration de centaines de sous-traitants, retour d'expérience, conduite du changement, etc.), elle a permis de mettre en évidence quelques autres sujets d'importance, à approfondir lors de l'évaluation par l'IRSN des dispositions retenues par EDF.

Au travers des entretiens menés dans le cadre de l'étude, il a pu être constaté que les OCC étaient perçus comme des structures ajoutées pour résoudre un problème de coordination et de coopération entre la conduite et la maintenance, ainsi que pour réduire des écarts culturels. Il est donc apparu judicieux d'examiner dans quelle mesure les COPAT pouvaient générer un surcroît de complexité dans la gestion des arrêts de tranche.

L'étude a aussi mis en évidence en Amérique du nord la diversité des structures-projets obéissant aux principes des OCC, reposant sur des effectifs variables (dix à 20 personnes) et avec des poids différents accordés à la conduite et la maintenance. La question d'une éventuelle adaptation des COPAT aux différents sites du parc électro-nucléaire français se posait.

L'importance accordée à la préparation (plus longue de quelques mois et standardisée) et à la maîtrise du volume prévu de travaux de maintenance en Amérique du nord a été relevée : l'exploitant ne tolère que 10 % de maintenance supplémentaire liée au « fortuit²²⁶ » par rapport au « volume » initial recensé six mois avant le début de l'arrêt. Dans le cas du parc français, le supplément a pu atteindre 100 % (50 % au cours des six mois précédents l'arrêt, 50 % au fil de l'arrêt). Ce constat soulevait diverses interrogations :

- Manque éventuel d'anticipation dans le cas du parc électronucléaire français, peu favorable d'un point de vue de l'organisation de la préparation des activités de maintenance ?
- Restriction de la maintenance liée au « fortuit » chez les exploitants d'Amérique du nord, favorable d'un point de vue organisationnel mais éventuellement au détriment de la fiabilité des équipements et de la sûreté ?

Il a été relevé aux États-Unis une longue professionnalisation des acteurs des OCC (trois années au titre d'adjoint dans un poste de l'OCC, puis huit années dans ce poste), facilitant le pilotage avec une plus grande sérénité, notamment lorsque surviennent des aléas. Cette situation était radicalement différente au Canada et en France. Il apparaissait

226. Le terme de fortuit recouvre à la fois ce qui a pu être oublié au moment du recensement effectué six mois avant l'arrêt et ce qui relève d'anomalies découvertes dans les six mois précédents l'arrêt ou pendant cet arrêt.

que les COPAT ne pouvaient pas constituer des centres d'apprentissage, ce qui renvoyait à des questions en termes de gestion des ressources humaines.

L'étude a aussi fait ressortir, chez les exploitants d'Amérique du nord, une articulation entre anticipation et réactivité, avec une nette préoccupation non seulement en termes d'anticipation des dysfonctionnements potentiels et des glissements de planning, mais aussi de préparation à faire face aux aléas potentiels (capitalisation des aléas précédents, équipes prédisposées à traiter des aléas similaires). Cet aspect était à examiner dans le cas des COPAT.

Enfin, l'étude a fait ressortir, pour les activités de maintenance, un recours à la sous-traitance significativement plus faible chez les exploitants d'Amérique du nord (30 %) que par EDF (80 %), avec des efforts de mutualisation entre sites, et une plus grande internalisation des supports logistique (qui assurent de bonnes conditions d'intervention de maintenance).

11.3.2. La gestion du recours à des entreprises prestataires

Les études menées entre 1992 et 1994 (paragraphe 11.3.1A et B) ont concerné essentiellement l'organisation et la réalisation des activités de maintenance pendant les arrêts de tranche. Au début des années 2000, l'IPSN a décidé d'engager une recherche sur le recours aux entreprises prestataires, car, d'une part celui-ci est en développement, notamment pour les activités de maintenance, d'autre part la sous-traitance dans le nucléaire fait l'objet de débats animés et finalement peu fondés sur des études approfondies.

A) Les relations de sous-traitance et leurs effets sur la sûreté et la sécurité

Il existe des travaux de recherche qui soulignent les conditions de travail difficiles de certains salariés d'entreprises prestataires et les mettent directement en relation avec leur statut de sous-traitant. Le recours à des entreprises prestataires est ainsi considéré comme un facteur de dégradation des conditions de réalisation du travail, voire de la qualité même du travail, donc de la sûreté. Cependant, il existe des arguments qui remettent en cause cet effet négatif du recours à la sous-traitance. Par exemple, depuis le démarrage des premières centrales, ce sont les salariés des constructeurs de certains équipements sensibles (pompes, vannes, etc.) qui assurent leur maintenance, et cette situation est très largement considérée comme un gage de qualité. De même, certaines interventions sont très éprouvantes, indépendamment du statut du salarié qui réalise le travail. Afin d'identifier plus précisément les effets de la sous-traitance, la recherche s'est intéressée à la relation de sous-traitance, à la manière dont cette relation est construite par l'action conjointe du donneur d'ordre et du prestataire, et à la manière dont cette relation a un effet en retour non seulement sur le travail des salariés prestataires, mais aussi sur le travail des salariés du donneur d'ordre.

Une telle recherche a été menée dans le cadre d'une thèse de sociologie en partenariat avec la SNCF²²⁷ et GrDF²²⁸ [20]. Ce partenariat a permis d'avoir accès à

227. Société nationale des chemins de fers.

228. Gaz réseau distribution France.

des chantiers réalisés principalement par des salariés d'entreprises prestataires : chantiers de renouvellement des voies et du ballast pour la SNCF, chantiers de renouvellement de réseaux de distribution de gaz pour GrDF. Plus de cinquante entretiens ont été réalisés à la SNCF et à GrDF, auprès de personnels situés aux niveaux local, régional et national et en charge de la préparation, la réalisation et le retour d'expérience des chantiers de maintenance. Ces entretiens ont permis de recueillir des données sur le sens que les acteurs donnent à leurs pratiques de travail, leurs représentations de leur métier et des relations qui les lient aux entreprises prestataires. Des observations ont également été réalisées lors de plusieurs chantiers. Par exemple, l'observation d'un chantier de renouvellement de ballast et traverses dans le nord de la France (de novembre 2007 à janvier 2008) a donné la possibilité d'assister à des réunions de programmation et de planification de chantiers élémentaires, de suivre le travail d'un agent chargé de l'engagement et du dégagement des trains de travaux sur les voies, etc.

Sans prétendre restituer les multiples éclairages apportés par ce travail de recherche, il est possible de dégager quelques constats et enseignements importants, évoqués ci-après.

Ce travail de recherche permet tout d'abord de dresser une typologie des différentes formes de sous-traitance²²⁹, incluant le cas de la sous-traitance interne au sein même d'une entreprise (aussi appelée sous-traitance intégrée). Des aspects liés à la sous-traitance « en cascade » sont aussi abordés dans ce travail de recherche.

Il ressort en second lieu qu'il existe de multiples types de relations entre donneurs d'ordre et entreprises prestataires, qui dépendent notamment de l'ampleur du recours à la sous-traitance, du degré de partage des compétences techniques entre donneur d'ordre et prestataire, de leur degré de dépendance réciproque, de la durée des contrats. L'effondrement, en 2003, de la passerelle du chantier du paquebot Queen Mary II à Saint-Nazaire est commenté, à titre d'exemple, pour faire ressortir un certain nombre d'aspects liés aux relations entre le donneur d'ordre (Les chantiers de l'Atlantique) et son prestataire (SAS Endel) qui ont mis en péril la sécurité du chantier et conduit *in fine* à l'accident²³⁰.

Il est montré combien le postulat que « *Les résultats en termes de qualité, de coûts et de délais sont toujours meilleurs sur le marché que ceux obtenus en interne fait oublier les coûts de transaction nécessaires pour rester « maître » de ses installations* ». Car la sous-traitance fait souvent naître une situation de « dématérialisation » de la sûreté ou de la sécurité, dans laquelle la surveillance sur le terrain peut être fortement réduite (voire proscrite), au profit d'une supervision basée sur la validation d'études techniques, le contrôle de données utilisées par le sous-traitant, avec un contrôle réduit par échantillonnage sur le terrain (sécurité ou sûreté « de papier »). La sous-traitance en cascade peut aggraver cette situation, et ainsi conduire à « *une migration du risque vers les maillons les plus faibles de la sous-traitance* ».

Le travail de recherche souligne par ailleurs que la sous-traitance a une répercussion en interne au donneur d'ordre, remettant ainsi en cause « *l'idée selon laquelle la*

229. Sont ainsi identifiées : la sous-traitance intégrée de spécialité ou de capacité, la sous-traitance externe de spécialité ou de capacité, enfin l'externalisation.

230. Ces facteurs ont été explicitement identifiés par l'enquête judiciaire.

sous-traitance est un simple « transfert » d'activité vers un prestataire sans modification profonde de l'organisation dans laquelle le changement s'opère ».

Un autre aspect mis en évidence est *« qu'il n'est pas possible d'étudier le lien entre sous-traitance et sécurité ou sûreté avec une vision rationalisatrice qui consisterait à dégager des facteurs qui agiraient directement sur la sécurité ou la sûreté et qui amèneraient à conclure qu'une intervention managériale sur tel ou tel facteur obtiendrait avec tel pourcentage de chances des garanties de sécurité ou de sûreté »*. Le travail de recherche met en évidence le caractère réducteur de « l'approche » de la sous-traitance sous l'angle uniquement de la « pérennité des compétences » du donneur d'ordre et de la « surveillance du prestataire ». La sous-traitance doit être pensée et analysée en tant que relation, voire partenariat.

Il est aussi pointé dans ce travail de recherche le fait que des sous-traitants « installés » – du fait d'une réputation acquise (et justifiée) –, peuvent bénéficier d'un cadre privilégié : *« les sous-traitants qui se savent bien positionnés se créent ainsi des marges de jeux importantes »*.

Ces constats et enseignements constituent autant de points d'attention pour les expertises menées par l'IRSN des modalités de sous-traitance chez les exploitants, notamment en 2015 pour ce qui concerne EDF. Ils ouvrent aussi la perspective à d'autres approfondissements en termes de recherche, tels par exemple que ceux prévus dans le cadre de la chaire RESOH.

B) Les relations de sous-traitance : la chaire RESOH

Après les progrès réalisés depuis les années 1980 en matière de facteurs humains puis organisationnels de la sûreté, les relations inter-organisationnelles, dont celles de sous-traitance, sont considérées comme un gisement de progrès de la sûreté, ceci ayant été attesté par les conclusions des « études complémentaires de sûreté » (ECS) réalisées par l'ASN et l'IRSN après l'accident de Fukushima. La chaire RESOH consacrée aux facteurs organisationnels et humains de la sûreté des sites industriels à risques, tout au long de leur cycle de vie depuis leur conception jusqu'à leur démantèlement, voire la gestion de leurs déchets, concentre ses efforts sur ces relations inter-organisationnelles.

La chaire RESOH a été inaugurée en mars 2012, pour une durée de cinq ans, par les quatre partenaires fondateurs : l'École des mines de Nantes, l'IRSN, AREVA et DCNS.

Cette chaire privilégie deux axes de recherche :

- les relations inter-organisationnelles, notamment à travers le développement des réseaux de sous-traitance et de cotraitance²³¹,
- l'insertion de la sûreté dans l'ensemble des contraintes et des dispositifs de gestion liés à la recherche de compétitivité industrielle.

La sûreté est un « construit » collectif qui met en jeu non seulement la responsabilité et l'activité individuelle de chaque acteur, mais aussi celles des équipes et des institutions

231. Ce terme vise le regroupement de sous-traitants entre eux (consortium) pour réaliser une prestation pour un exploitant.

dans leur globalité (entreprises donneurs d'ordre, sous-traitants et co-traitants, contrôleurs, etc.). La chaire RESOH s'est donnée comme objectif d'analyser la construction de la sûreté à l'échelle du système formé par les relations complexes qui s'établissent entre tous ces acteurs, en tenant compte de leur environnement (économique, juridique, social, etc.).

La chaire RESOH vise à apporter des réponses à ces problématiques en identifiant les points de vulnérabilité, de robustesse et de résilience²³² des réseaux de sous-traitance et de co-traitance et en étudiant les pratiques managériales et les dispositifs de gestion à même de renforcer la sûreté au sein de ces réseaux.

Deux dispositifs de recherche sont mis en place :

- des études de terrain qualitatives, mobilisant les techniques de la sociologie du travail et de l'ethnographie en organisation,
- un observatoire des pratiques de la sous-traitance, dans une optique quantitative et transverse.

La chaire RESOH ambitionne dans un second temps d'intégrer d'autres partenaires que ceux précités et de s'ouvrir à d'autres pans de l'industrie.

Les travaux de recherche en cours dans le cadre de la chaire RESOH sur la gestion de projets complexes et de recours à la sous-traitance portent sur deux sujets :

- la contribution du planning d'arrêt de réacteur à l'amélioration de la maîtrise du temps et de la coordination entre les acteurs,
- le rôle du contrat dans l'engagement réciproque entre donneur d'ordre et prestataire.

Ces travaux s'appuient sur des études de terrain avec AREVA (La Hague) et DCNS (Cherbourg).

11.4. Études et recherches en matière de sciences humaines et sociales : le projet AGORAS

Dans son message introductif au rapport de la commission d'enquête indépendante commanditée par la Diète japonaise sur l'accident survenu à la centrale de Fukushima Daiichi, le président de cette commission, K. Kurokawa, évoque un certain nombre de facteurs de nature sociétale qui, pour cette commission, ont contribué à un accident « qui aurait pu être prévu ». Il parle d'un « état d'esprit qui a nourri la négligence à la source de cette catastrophe », de désastre « *made in Japan* » et de raisons fondamentales de nature culturelle. Les considérations de K. Kurokawa ont une portée générale et doivent interpeller tous les acteurs impliqués dans la « gouvernance » de risques, de quelque nature qu'ils soient. C'est dans ce domaine, qui relève des sciences humaines et sociales, que l'IRSN a décidé en 2012 d'entreprendre de nouvelles recherches, dans le cadre

232. Capacité d'adaptation à une situation imprévue.

notamment du projet AGORAS. Ces nouvelles recherches ne visent donc pas les facteurs humains et organisationnels concourant à la sûreté au niveau de l'exploitation des installations nucléaires elles-mêmes, mais au niveau plus général du fonctionnement de tous les acteurs impliqués dans la sûreté et dans son contrôle.

En France, les évaluations complémentaires de sûreté (ECS) menées à la suite de l'accident de Fukushima ont souligné l'importance d'étudier le lien entre la sûreté et les relations inter-organisationnelles. C'est précisément sur ce sujet, encore peu exploré, qu'est concentré le projet AGORAS (Amélioration de la gouvernance des organisations et des réseaux d'acteurs pour la sûreté nucléaire) qui a été retenu fin 2013 dans le cadre de l'appel à projets de recherche en matière de sûreté nucléaire et de radioprotection (RSNR) lancé par l'ANR, impulsé au plus haut niveau de l'État. Il vise à comprendre comment se construisent et évoluent les équilibres institutionnels qui impliquent non seulement les exploitants, leurs sous-traitants et partenaires, mais également les autorités de sûreté et les instituts publics d'expertise, dans un contexte où la société civile tend à jouer un rôle croissant. L'accent sera mis sur le dialogue qui s'instaure entre les parties prenantes et qui fonde en partie le niveau de sûreté de l'industrie nucléaire dans son ensemble.

La durée prévue du projet AGORAS est de six ans. Ce projet est structuré autour d'un volet « prévention de l'accident » et d'un volet « gestion de la crise ». L'objet du premier volet est l'analyse de l'impact de l'accident de Fukushima sur l'« approche » de la sûreté des installations et sur les relations entre acteurs de la gouvernance des risques nucléaires. L'objet du second est l'analyse de la manière dont cet accident contribue à faire évoluer la perception de l'accident nucléaire et les modalités de préparation à la gestion d'une situation accidentelle puis post-accidentelle. Y sera analysée l'évolution des organisations et des doctrines en matière de gestion de crise depuis l'accident de TMI, sur la base d'un retour d'expérience d'exercices de crise et de crises réelles (l'inondation de la centrale du Blayais à la fin de l'année 1999 pourrait être un exemple). Les résultats attendus concernent la mise en évidence des facteurs de vulnérabilité liés à la complexification croissante des acteurs et dispositifs institutionnels de gestion de crise, des pistes d'améliorations, des possibilités d'introduction d'un plus grand réalisme dans les exercices de simulation.

Au sein du projet, l'IRSN pilote deux actions. La première (action n° 1, de 2014 à 2018) a pour objectif l'identification des conditions organisationnelles et culturelles qui ont pu favoriser les décisions relatives à la centrale de Fukushima (choix techniques, options de dimensionnement, etc.) qui se sont *in fine* révélées inadaptées. Cette action comporte deux axes de recherches :

- le premier est consacré à l'étude des processus d'évaluation et de décisions techniques. Il s'agit de comprendre, dans le cadre d'un travail de type analyse socio-historique développée par ailleurs pour analyser certains « grands accidents » (par exemple l'accident de la navette Challenger), les dynamiques et les facteurs qui peuvent expliquer que certains concepts, outils et données sont mal connus, ignorés ou mal pris en compte par tout ou partie des acteurs participant à la gouvernance des risques nucléaires. Ce travail s'appuie sur l'analyse de cas français ;

- le second axe est consacré à l'analyse de l'élaboration et de la mise en œuvre d'instruments de régulation des risques, comme le « référentiel grands froids » ou le « guide inondation » (cf. paragraphe 8.2 du présent ouvrage). Il s'agit d'analyser les dynamiques et les représentations à l'œuvre lors de leur élaboration et la manière dont celles-ci sont à même de renforcer ou au contraire de fragiliser la légitimité de l'instrument. Comment sont interprétés et utilisés certains outils, données, préconisations ou démarches proposés ? Quels écarts ou amendements, par rapport à l'intention initiale des concepteurs de ces instruments, sont finalement acceptés par le régulateur ? Avec quelles limites, quels contrôles, quelles évaluations d'impact ?

La seconde action (action n° 2, de 2013 à 2018) concerne le dialogue technique engagé après l'accident dans le cadre des évaluations complémentaires de sûreté (ECS) et vise à comprendre la manière dont la survenue d'un accident majeur peut conduire au réexamen de pratiques de sûreté antérieures ; il s'agira notamment d'identifier les conditions qui favorisent ce réexamen mais aussi celles qui y font obstacle. Les ECS ont en effet ouvert une période de dialogue technique intense entre les exploitants, l'ASN et l'IRSN. Concrètement, il s'agira de répondre aux questions suivantes : quelles nouvelles dynamiques entre organisations seront mises à jour par les argumentaires, et les controverses éventuelles, qui surviendront entre les différents acteurs ? Quelles « ruptures paradigmatiques » (l'accident non envisagé s'étant produit) ou au contraire quelles manifestations de « défense » sous-tendront les argumentaires avancés ? Comment la médiatisation de certains débats et le contexte particulier de prolongement de la durée d'exploitation des centrales influenceront-ils le positionnement et les argumentations des principaux acteurs de la sûreté ?

Références

- [1] Proceedings CSNI specialist meeting on operator training and qualifications (12–15 October 1981, Charlotte, N.C., USA), NEA/CSNI-63, Vol. 1, Vol. 2, 1982.
- [2] Identifying significant human actions in reactor accidents, NEA/CSNI-89, 1984.
- [3] Analysis of incidents involving cognitive error and erroneous human actions, NEA/CSNI-180, 1990.
- [4] Proceedings of the Specialist Meeting on Operator Aids for Severe Accidents Management and Training (1993, Halden, Norway), NEA/CSNI/R(1993)9, 1993.
- [5] Conclusions of the Specialist Meeting on Operator Aids for Severe Accident Management and training (Samoa) (1993, Halden, Norway), NEA/CSNI/R(1994)13a, 1994.
- [6] Joint OECD/NEA-IAEA Symposium on Human Factors and Organisation in NPP maintenance outages: impact on safety (1995, Stockholm, Sweden), NEA/CSNI/R(1995)27, 1995.
- [7] Identification and Assessment of Organisational Factors Related to the Safety of NPPs: State-Of-the-Art Report (SOAR), NEA/CSNI/R(1998)17, Vol. 1, Vol. 2, 1998.
- [8] Report on the CSNI Workshop on Nuclear Power Plant Transition from Operation into Decommissioning: Human Factors and Organisation Considerations, NEA/CSNI/R(1999)17, Rome, Italy, May 17–18, 1999.

- [9] Identification and Assessment of Organisational Factors Related to the Safety of NPPs, State-Of-the-Art Report (SOAR), NEA/CSNI/R(1999)21, Vol. 1, Vol. 2, 1999.
- [10] CSNI Technical Opinion Papers No. 12, Research on Human factors in New Nuclear Plant Technology – also referenced as: NEA No. 6844, NEA/CSNI/R(2009)7, 2009.
- [11] F. Jeffroy *et al.*, De l'évaluation de la sûreté à la recherche dans le domaine des facteurs humains : le cas de l'activité de conduite avec procédures informatisées, p. 237–249. In: sécurité et cognition, Ganascia J-G. Editeur. Hermes, Paris, 1999.
- [12] E.M. Roth, K.B. Bennett and D.D. Woods, Human interaction with an "intelligent" machine. *International Journal of Man-Machine studies*, 27:479–525, 1987.
- [13] Amalberti R., *La conduite des systèmes à risques*, Presses universitaires de France, Paris, 1996.
- [14] A Human and Organizational Factors Perspective on the Fukushima Nuclear Accident, IRSN report PSN-SRDS/SFHOREX No. 2015-01, 2015.
- [15] Charles Perrow, *Normal accident, living with high risk technology*, Princeton University Press, new edition, 1999.
- [16] Mathilde Bourrier, *Le nucléaire à l'épreuve de l'organisation*, Presses universitaires de France, 1999.
- [17] Diane Vaughan, "The Challenger launch decision, risky technology, culture and deviance at NASA", The University of Chicago Press, 1996.
- [18] Cynthia Colmellere, « Quand les concepteurs anticipent l'organisation pour maîtriser les risques : deux projets de modifications d'installations sur deux sites classés SEVESO 2 », thèse de doctorat de sociologie, Université de Compiègne, 2008.
- [19] M. Crozier, E. Friedberg, *L'Acteur et le système*, Éditions du Seuil, 1977, 1981.
- [20] Marie Ponnet, « Les relations de sous-traitance et leurs effets sur la sûreté et la sécurité dans deux entreprises : SNCF et GrDF », thèse de doctorat de sociologie, Université de Nantes, 2011.