HAL
open science

Fukushima-Daiichi, le temps de l'ingénierie de l'urgence

Franck Guarnieri, Sébastien Travadel

To cite this version:

Franck Guarnieri, Sébastien Travadel. Fukushima-Daiichi, le temps de l'ingénierie de l'urgence. [Rapport de recherche] CRC_WP_2014-21, MINES ParisTech. 2014, 23 p. hal-00991626

HAL Id: hal-00991626

https://minesparis-psl.hal.science/hal-00991626

Submitted on 2 Jul 2014

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.

PAPIERS DE RECHERCHE CRC WORKING PAPERS SERIES

CRC_WP_2014_21

(mai 2014)

FUKUSHIMA-DAIICHI, LE TEMPS DE L'INGÉNIERIE DE L'URGENCE.

Franck Guarnieri, Sébastien Travadel

CENTRE DE RECHERCHE SUR LES RISQUES ET LES CRISES
MINES ParisTech
Rue Claude Daunesse CS10207
06904 Sophia Antipolis Cedex
www.crc.mines-paristech.fr

PAPIERS DE RECHERCHE DU CRC

Cette collection a pour but de rendre aisément disponible un ensemble de documents de travail et autres matériaux de discussion issus des recherches menées au CRC (CENTRE DE RECHERCHE SUR LES RISQUES ET LES CRISES).

Tous les droits afférant aux textes diffusés dans cette collection appartiennent aux auteurs.

Des versions ultérieures des papiers diffusés dans cette collection sont susceptibles de faire l'objet d'une publication. Veuillez consulter la base bibliographique des travaux du CRC pour obtenir la référence exacte d'une éventuelle version publiée.

http://hal-ensmp.archives-ouvertes.fr

CRC WORKING PAPERS SERIES

The aim of this collection is to make easily available a set of working papers and other materials for discussion produced at the CRC (CENTRE DE RECHERCHE SUR LES RISQUES ET LES CRISES).

The copyright of the work made available within this series remains with the authors.

Further versions of these working papers may have been submitted for publication. Please check the bibliographic database of the CRC to obtain exact references of possible published versions.

http://hal-ensmp.archives-ouvertes.fr

CENTRE DE RECHERCHE SUR LES RISQUES ET LES CRISES
MINES ParisTech
Rue Claude Daunesse CS 10207
06904 SOPHIA ANTIPOLIS Cedex
www.crc.mines-paristech.fr

Fukushima-Daiichi, le temps de l'ingénierie de l'urgence.

Franck GUARNIERI et Sébastien TRAVADEL

Centre de recherche sur les Risques et les Crises, MINES ParisTech, mai 2014

Pour citer ce document : Guarnieri F., Travadel S., 2014, Fukushima Daiichi, le temps de l'ingénierie de l'urgence, papier de recherche du Centre de recherche sur les Risques et les Crises (CRC) de MINES ParisTech, mai 2014.

Résumé : Le retour d'expérience de l'accident de Fukushima-Daiichi a mis l'accent sur les mesures de prévention destinées à protéger les réacteurs nucléaires ainsi que sur les méthodes de gestion de crise classiquement convoquées. Cependant, les conditions sur le site relèvent d'un accident qui n'en finit plus. Après les événements du 11 mars 2011, la manière dont sont conduites les opérations d'ingénierie visant à sécuriser les installations offre une nouvelle perspective sur la capacité des organisations à s'adapter à des situations qui vont bien au-delà des cadres déterministes. Dans cet article, nous examinons cette figure extrême de l'ingénierie, dénommée « ingénierie de l'urgence ».

Mots clefs : Accident nucléaire, ingénierie de l'urgence, défense en profondeur, urgence, ingénierie

Si les accidents nucléaires de Three Mile Island et de Tchernobyl ont conduit à l'introduction de nouveaux concepts liés à la sûreté nucléaire, la réflexion sur l'accident de Fukushima-Daiichi est paradoxalement restée circonscrite au renforcement des défenses en profondeur et des directives pour la gestion d'un accident sévère. Pourtant ce déficit analytique ne doit pas laisser penser que l'accident japonais se réduit à une accumulation de défaillances ou de dommages de grande envergure. Nous proposons de décrypter cet événement comme une *réaction en chaîne* qui continue de déclencher depuis plus de trois ans des situations de crise régulières dans un contexte d'urgence sociétale. Dans cette perspective, l'ensemble des projets d'ingénierie conduits en parallèle pour contenir les risques et permettre l'extraction des combustibles, sont autant d'initiatives de l'exploitant et des industriels pour recouvrer la maîtrise des installations et garantir un état de sûreté à la hauteur des enjeux et des exigences planétaires. Nous nommerons « ingénierie de l'urgence » le mode particulier d'intervention dans un tel contexte.

La séquence d'accident et l'activité en cours sur le site illustrent une situation d'urgence née d'un dépassement des référentiels d'ingénierie classiquement pris en compte pour la conception et l'exploitation. Ce dramatique événement interroge donc la capacité des acteurs du nucléaire, dans la période post accidentelle, à entrer en « résilience », et ce en dehors des cadres déterministes de

sûreté (1). C'est pour proposer des voies de progrès dans ce domaine que nous introduisons le concept « d'ingénierie de l'urgence ». L'ingénierie de l'urgence, à condition d'être correctement formalisée, peut en effet constituer une stratégie efficace pour répondre à une situation extrême (2). Plus largement, il s'agit de donner une dimension nouvelle aux fondements de la gestion de la sûreté nucléaire : ainsi en complément d'une sécurité prescriptive, la capacité à entrer en résilience permet de renforcer la robustesse d'un exploitant face aux situations « hors scénarios » (3).

1 L'URGENCE, UNE FAILLITE DE L'INGENIERIE

Les premières analyses sur les causes de l'accident de Fukushima-Daiichi mettent en avant les lacunes des référentiels de sûreté pris en compte par l'exploitant et les autorités de surveillance (1.1). De même, la crise qui se prolonge depuis le 11 mars 2011 démontre que les opérations d'ingénierie qui se multiplient pour contenir les nombreuses menaces sont insuffisantes, en particulier quand les mesures de sécurisation s'avèrent défaillantes en situation d'urgence (1.2). Les retours d'expérience devraient ainsi conduire à une amélioration de la capacité des exploitants à entrer en résilience (1.3).

1.1 DES REFERENTIELS DE CONCEPTION ET D'EXPLOITATION INADEQUATS

A ce jour, il est établi [(1)] que le tremblement de terre a provoqué l'arrêt automatique des réacteurs et la perte de toutes les alimentations électriques externes. Les groupes électrogènes de secours sont alors entrés en service et on alimenté les systèmes de refroidissement de secours des réacteurs n°1, 2 et 3. Le tsunami qui a suivi a noyé les groupes électrogènes, rendant les équipements de mesure et les mécanismes de pilotage des vannes inopérants. Les conditions d'opération dans les salles de commande et la communication entre ces salles et la cellule de crise sur site sont alors devenues particulièrement difficiles. Le système IC [(2)] de refroidissement de secours du réacteur n°1 s'est automatiquement interrompu, tandis que les systèmes de refroidissement RCIC [(3)] des réacteurs n°2 et 3 ont continué à fonctionner normalement (le HPCI [(4)] du réacteur n° 3 ayant plus tard pris le relais du RCIC défaillant).

Les séquences de défaillances de chacune des tranches n°1, 2 et 3 se sont déroulées de manière relativement indépendante, le contrôle des réacteurs en cas d'urgence étant de la responsabilité du chef de quart de chaque tranche [(5)]. La supervision d'ensemble par la cellule de crise sur site a été défaillante, notamment en raison de la transmission par les chefs de quart d'informations erronées ou lacunaires.

La non-détection de l'arrêt automatique de l'IC du réacteur n°1 (du fait d'une connaissance insuffisante du système par ses opérateurs), la défaillance du RCIC du réacteur n°2 après trois jours de fonctionnement, ou encore l'arrêt volontaire du HPCI du réacteur n°3 (en anticipation d'une défaillance éventuelle) ont conduit à l'interruption du refroidissement des combustibles, sans que

---

(1) Rapport officiel de la commission d'enquête parlementaire japonaise indépendante sur l'accident de Fukushima, disponible depuis le lien suivant : http://www.nirs.org/fukushima/naiic_report.pdf

(2) Isolation Condenser (condenseur d'isolement).

(3) Reactor Core Isolation Cooling system (système de refroidissement du cœur du réacteur en situation d'isolation).

(4) High-Pressure Coolant Injection system (système d'injection de sécurité haute-pression).

(5) Certains événements survenus sur l'une des tranches ont pu toutefois en affecter une autre : l'explosion au niveau du réacteur n°3 a par exemple perturbé l'installation du dispositif d'injection d'eau de mer dans le réacteur n°2. La proximité des différentes tranches a pu constituer une faiblesse à cet égard.

l'exploitant évalue correctement l'état de chaque réacteur. Les dommages aux installations et l'impréparation à une telle situation ont en outre retardé la mise en œuvre des solutions alternatives de refroidissement à l'eau de mer. Parallèlement, les difficultés rencontrées pour alimenter en électricité les soupapes de dépressurisation et les vannes des lignes d'éventage ont fortement perturbé le contrôle de la pression dans les enceintes de confinement, ce qui a retardé l'injection d'eau. Les trois réacteurs n'ont ainsi pas été refroidis pendant plusieurs heures. Des explosions, probablement dues à l'hydrogène généré par l'oxydation et la fissuration des gaines de combustible lors de la fusion des cœurs, ont endommagé les structures des réacteurs n°1 et 3. Il s'en est suivi une déflagration dans le bâtiment du réacteur n°4, dont la tuyauterie était reliée à celle du réacteur n°3, fragilisant la piscine d'entreposage des combustibles de cette tranche. Des fuites ont été constatées au niveau de l'enceinte du réacteur n°2. L'ensemble de ces dommages ont provoqué d'importants rejets radioactifs.

La commission d'enquête indépendante instaurée par le Parlement japonais a pointé les carences dans l'action du gouvernement de Tokyo, des autorités nucléaires japonaises et de l'exploitant TEPCO, que ce soit dans la gestion immédiate de la crise, dans le suivi quotidien des événements de sécurité, dans la mise à jour des analyses de risque et des normes de conception ou encore dans la surveillance de l'opérateur[(6)].

Notons toutefois que les causes de l'accident devront être précisées au fil de la sécurisation des installations et que les investigations sur les défaillances se poursuivent. Les raisons de l'arrêt du RCIC du réacteur n°3, l'origine de l'explosion qui a endommagé la structure de la tranche 3 ou encore l'ampleur des dommages générés par le corium des cœurs en fusion demeurent ainsi inconnues.

1.2 DEFAILLANCES DES MESURES DE SECURISATION EN SITUATION D'URGENCE

Au fil du temps, l'exploitant TEPCO a mis en place des moyens alternatifs pour assurer le refroidissement et l'inertage à l'azote des enceintes de confinement et des cuves des réacteurs. Le site étant toujours exposé aux risques sismiques et aux inondations, certains de ces équipements ont été placés dans des zones surélevées et des dispositifs de protection contre les tsunamis ont été construits. Des instruments de mesure ont également été installés pour assurer la surveillance des paramètres essentiels. Des moyens de surveillance à distance ont été déployés pour faciliter la détection de fuites. L'exploitant entend ainsi stabiliser l'état des infrastructures.

Depuis l'accident, des volumes d'eau de l'ordre de 400 m^3 sont injectés chaque jour dans les cœurs des réacteurs n°1, 2 et 3 pour leur refroidissement. Afin d'éviter le débordement des cuves, l'exploitant a initialement mis en œuvre, avec l'appui d'entreprises étrangères, un système de refroidissement en circuit fermé prenant en compte la contamination au césium. Un dispositif décontaminant l'eau de l'ensemble des radionucléides a depuis été mis au point, mais son exploitation s'avère chaotique et est régulièrement interrompue par des avaries. En outre, l'étanchéité entre le circuit de refroidissement et l'eau des nappes phréatiques n'est pas garantie. Environ 800 m^3 d'eau contaminée sont pompés chaque jour dans les réacteurs pour être traités [(7)] mais le niveau élevé de contamination de l'eau récupérée dans les bâtiments des réacteurs empêche son rejet dans l'océan. Une partie de cette eau est donc stockée dans des réservoirs temporaires dont la fiabilité s'avère parfois insuffisante et les conditions d'exploitation parfois défaillantes. Afin

[(6)] Rapport officiel de la commission d'enquête parlementaire japonaise indépendante sur l'accident de Fukushima, op. cit.

[(7)] Source : ministère japonais de l'économie, du commerce et de l'industrie, disponible en japonais sur le lien http://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/pdf/140115/140115_01c.pdf

de pérenniser le refroidissement des réacteurs, l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) recommande désormais à TEPCO d'étudier les conditions dans lesquelles il serait possible de décharger dans l'océan de manière contrôlée une partie de l'eau stockée [8]. L'exploitant a publié en décembre 2011 un plan de « reprise de contrôle », approuvé par le gouvernement japonais et mis à jour depuis [9] qui prévoit d'évacuer les combustibles entreposés dans la piscine du réacteur n°4 préalablement au démantèlement de la centrale. A cette fin, pendant plus de deux ans, TEPCO a entrepris d'importants travaux préparatoires de génie civil notamment pour renforcer la structure de la piscine et construire des bâtiments de manutention des combustibles. Désormais, l'évacuation des combustibles a débuté et devrait se poursuivre sur plus d'un an, dans des conditions risquées compte tenu des incertitudes qui subsistent sur leur état. Un programme de recherche et de développement a été défini pour apporter un soutien scientifique aux activités de traitement des déchets [10].

D'autres travaux sont conduits pour prévenir les infiltrations d'eau en provenance ou vers les nappes phréatiques, pour permettre l'accès aux enceintes des réacteurs n°1, 2 et 3 et déblayer des débris, ou encore pour préparer des lieux de stockage des déchets radioactifs. Un mur d'isolation est en construction pour limiter l'écoulement des eaux contaminées dans l'océan.

TEPCO poursuit donc une intense activité sur le site de l'accident, en vue de contenir les pollutions radioactives et reprendre le contrôle des installations. Il s'agit pour l'exploitant d'établir un mode de fonctionnement en adéquation avec des exigences de sûreté légitimement acceptées par la société civile, et ainsi permettre les opérations de démantèlement de la centrale planifiées jusqu'en 2050. L'acceptabilité de ces opérations par l'opinion publique japonaise et la communauté internationale est en partie conditionnée par la fiabilité des dispositifs et la transparence des mesures de radioactivité, rendues délicates par l'état dégradé du site. Ces travaux sont ainsi régulièrement impactés par des situations d'urgence, notamment lorsque des émissions de vapeur ou des fuites sont constatées (par exemple au niveau du bâtiment du réacteur n°3 [11]). Autres cas critiques relevés pour ces travaux : des niveaux de contamination élevés mesurés à proximité de la centrale ou encore des défaillances des systèmes de décontamination de l'eau.

1.3 PREMIERS ENSEIGNEMENTS, NOUVELLES PERSPECTIVES ET CAPACITE A ENTRER EN RESILIENCE

Face à l'ampleur de l'accident nippon, les autorités des pays membres de l'Agence pour l'énergie nucléaire (AEN) ont conduit des études complémentaires de sûreté pour tenir compte d'hypothèses « hors dimensionnement » (niveau 4) ou de scénarios de défaillances multiples. Ces études ou scénarios complémentaires n'ont pas mis à jour de risque imminent sur les centrales en service et la validité du concept de défense en profondeur a été réaffirmée par l'AEN [12]. Cela dit de nombreux efforts resteraient à accomplir pour mettre en œuvre efficacement ce concept.

---

[8] Source AIEA : Mission Report – IAEA International Peer Review Mission on Mid-and-Long-Term Roadmap towards the Decommissioning of TEPCO's Fukushima-Daiichi Nuclear Power Station Units 1-4, 25 November – 4 December 2013.

[9] Source : TEPCO, Progress Status and Future Challenges of Mid-to-long Term Roadmap towards the Decommissioning of Units 1-4 of TEPCO Fukushima Daiichi Nuclear Power Station (Outline), mise à jour du 28 novembre 2013.

[10] Source : AIEA, op. cit.

[11] Source : TEPCO, communiqué de presse du 20 janvier 2014, Water Flow Identified at First Floor of Unit 3 Reactor Building -Water which flows from near the Main Steam Isolation Valve Room to the Drainage Ditch on the Floor.

[12] Source AEN : The Fukushima-Daiichi Nuclear Power Plant Accident – OECD/NEA Nuclear Safety, Response and Lessons learnt, 2013, NEA n° 7161.

Le retour d'expérience, toujours en cours, a dès lors pour objectif de renforcer certains dispositifs de sûreté, en vue de conforter les marges de sécurité dans les cas de phénomènes exceptionnels. Les travaux se poursuivent, au plan tant normatif que technique, pour mieux intégrer l'hypothèse de menaces rares et extrêmes, améliorer la communication de crise et la performance des acteurs de première ligne en situation dégradée et préciser les critères de choix du site d'implantation d'une centrale. Renforcer la robustesse des équipements électriques et la sécurité des systèmes de ventilation de l'hydrogène, ou encore faire évoluer les méthodes d'analyse des risques induits par des phénomènes naturels font aussi partie des travaux en cours. L'hypothèse de destructions simultanées de plusieurs installations d'un même site est désormais également intégrée aux directives de gestion des accidents sévères, en ce qu'elle requiert de disposer de ressources supplémentaires dans la durée. Certains exploitants ont d'ailleurs organisé des équipes d'intervention rapide prêtes à intervenir sur site lors d'une telle crise, en soutien technique et humain de l'exploitant de la centrale.

Sur le plan académique, l'accident a questionné la problématique de la résilience des systèmes sociotechniques complexes durablement atteints par des évènements catastrophiques. De manière générale, la « résilience » d'un système peut se définir comme sa capacité intrinsèque à adapter son fonctionnement avant, pendant ou après des changements ou des perturbations, de sorte qu'il poursuive un ensemble d'opérations déterminées dans des conditions attendues ou, le cas échéant, inattendues (Hollnagel *et al.*, 2005). Pour développer cette capacité d'adaptation, il est donc nécessaire de ne pas circonscrire la réponse aux menaces à des fonctions et procédures prévues au stade de la conception et dimensionnées à partir d'hypothèses de sûreté (Fujita *et al.*, 2013). On relèvera notamment que la projection sur un site accidenté d'équipes de renfort technique ou de moyens matériels est une procédure d'urgence qui relève de la planification. Elle ne garantit pas, en elle-même, la capacité de l'organisation à s'adapter à un contexte imprévu et durable. Certains auteurs ont d'ailleurs relevé des limites aux hypothèses prises en compte dans les lignes directrices pour la gestion des accidents sévères telles qu'elles sont été modifiées à la suite de Fukushima-Daiichi (Vayssier, 2012).

Dès 1977, Carlsen et Fink (Carlsen *et al .*, 1978) avaient soulevé avec acuité une question similaire, à la suite de coupures d'électricité survenues aux États-Unis. Les auteurs avaient établi différents états du réseau d'alimentation électrique et avaient souligné que le mode opératoire en condition normale ne pouvait structurellement pas répondre aux exigences de contrôle d'un système en « état d'urgence ». Dans cet état, caractérisé par le manque de ressources et la pression temporelle, l'opérateur devait être en mesure d'accomplir des « actions héroïques », coordonnées en plusieurs points du réseau, pour éviter l'effondrement puis recouvrer au plus vite son fonctionnement en mode nominal.

Fukushima-Daiichi nous rappelle les progrès à accomplir dans cette voie. Plus précisément, la situation à laquelle est confrontée actuellement TEPCO illustre la difficulté pour une organisation à infléchir une dynamique accidentelle dans des conditions matérielles et organisationnelles critiques. Nous nous intéresserons alors à la capacité à « entrer en résilience », soit l'aptitude d'un système sociotechnique à recouvrer dans un court laps de temps un état garantissant au minimum la non-aggravation de la situation, dans des conditions d'urgence et sous une forte « pression » sociétale. Le système doit donc mobiliser toutes les ressources disponibles – alors que celles-ci peuvent sembler de prime abord limitées –, à la suite d'un événement lui ayant causé des dommages d'une ampleur telle que son activité est sérieusement perturbée voire totalement annihilée.

Remarquons que la résilience est une capacité d'action, inscrite dans la durée, avant, pendant et après l'émergence de menaces. Pour étudier les facteurs organisationnels qui favorisent l'entrée en

résilience du système, nous devons donc nous détacher d'un découpage statique et formel « accident – état d'urgence – phase post-accidentelle » [13] et avoir une vision inscrite dans la durée. D'ailleurs, si « officiellement » la phase d'urgence est achevée à Fukushima-Daiichi, le risque de pollution voire d'accident nucléaire ne peut être écarté tant la sécurisation des combustibles s'avère délicate et que la menace d'un tremblement de terre (suivi ou pas d'un tsunami) reste avérée.

Signe encourageant d'une entrée en résilience : deux ans après l'accident, l'AIEA a constaté les progrès de l'exploitant TEPCO, qui adopte une démarche de plus en plus proactive pour faire face au défi du démantèlement de la centrale, et utilise des solutions technologiques innovantes [14]. L'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) a aussi confirmé que TEPCO a su tirer parti du retour d'expérience sur les incidents d'exploitation afin d'améliorer les travaux d'ingénierie au stade de la conception [15]. Ces éléments participent, de fait, d'une entrée en résilience, même si à ce jour l'exploitant semble toujours subir les aléas. Il est par conséquent légitime de s'interroger sur les facteurs qui auraient permis d'accélérer l'entrée en résilience de l'exploitant dès les premiers instants de l'accident, pour prévenir l'enchaînement ininterrompu des événements néfastes depuis le 11 mars 2011. Dans le cas d'une activité hautement technique telle que l'exploitation d'une centrale, il s'agit pour l'essentiel d'étudier la conduite de travaux d'ingénierie dans des conditions inhabituelles et un environnement extrêmement hostile.

2 L'INGENIERIE, UNE REPONSE FACE A L'URGENCE

Les référentiels de sûreté prescrivent des performances attendues d'un projet d'ingénierie. Comme nous l'avons relevé, leur dépassement, que ce soit en raison d'événements imprévus ou de la non-application des procédures d'exploitation, peut provoquer une catastrophe. Mais l'ingénierie, à travers les stratégies qu'elle met en œuvre pour répondre à une question d'ordre technique, peut également apporter une capacité d'adaptation et d'entrée en résilience. En l'absence, à notre connaissance, de formalisation d'une telle activité, nous la nommerons « ingénierie de l'urgence ». Dans un premier temps, nous proposons de préciser le concept d'ingénierie (2.1), puis nous introduirons les concepts d'urgence (2.2) et, enfin celui « d'ingénierie de l'urgence » (2.3).

2.1 DEFINITION DU CONCEPT D'INGENIERIE

D'une manière générale l'ingénierie est définie comme « *l'étude globale d'un projet industriel sous tous ses aspects (techniques, économiques, financiers, sociaux), coordonnant les études particulières des spécialistes* » et, par extension, on parle d'ingénierie pour désigner une « *discipline d'applications scientifiques correspondant à un domaine de connaissances en sciences pures* » [16]. L'ingénierie est une activité destinée à structurer la démarche de conception et de fabrication de produits répondant à un besoin spécifique. Les équipes d'ingénieurs s'appuient sur une formalisation en cascade par des

[13] Les travaux de certaines autorités pour aider à la décision en cas d'accident « sans précédent » abordent également la notion de résilience et se situent formellement au niveau post-accidentel. Ils se focalisent néanmoins sur les conditions de retour à une vie normale des populations touchées par une pollution radiologique. Voir notamment aux États-Unis les travaux du National Council on Radiological Protection & Measurements, Approach to Optimizing Decision-Making for Late-Phase Recovery from Nuclear or Radiological Terrorism Incidents.

[14] Source AIEA : Mission Report op. cit.

[15] Source IRSN : Accident nucléaire de Fukushima-Daiichi - Gestion des eaux contaminées provenant des réacteurs accidentés, situation à fin juin 2013.

[16] Définitions empruntées au Dictionnaire culturel en langue française, Le Robert, Paris, 2005.

processus et un phasage, de la conception à la réalisation sur site en passant par l'achat [17], qui doit assurer la programmation du projet et sa traçabilité.

B. V. Koen a proposé de définir la « méthode d'ingénierie » comme une stratégie pour provoquer le meilleur changement possible à l'aide des ressources disponibles, dans une situation mal comprise ou entachée d'incertitudes (Koen, 1985). En ce sens, l'ingénieur se distingue du scientifique, à la recherche de prédicats vrais ou faux qui fondent un corpus de connaissances. L'ingénieur arraisonne la science à travers la technique, dans une optique d'effectivité : il est jugé sur la performance à l'usage du produit. Comme le souligne cet auteur, la première étape du travail de l'ingénieur consiste à formaliser le besoin de changement exprimé par un corps social. Cette étape conceptuelle comporte une part d'incertitude quant au résultat final et au moyen d'y parvenir. L'objectif visé par le changement est d'ailleurs susceptible d'évoluer au cours du projet. C'est pour parer à de tels aléas que des méthodes d'ingénierie formalisées à travers le « manifeste AGILE » sont par exemple apparues dans le monde de l'informatique puis dans l'industrie manufacturière [18].

L'avantage de la définition de B. V. Koen est de souligner la contrainte des ressources qui pèse sur l'ingénierie : l'ingénieur ne peut atteindre qu'une réponse approximative à une question posée, en fonction des ressources disponibles. L'ingénierie comporte donc de l'incertitude que le recours à des méthodes heuristiques, fondées sur les résultats d'expériences passées, vise à maîtriser. L'art de l'ingénieur consiste alors à manier les différentes méthodes heuristiques pour résoudre un problème donné. Le caractère optimal du résultat est apprécié selon des critères socioculturels. C'est d'ailleurs l'un des fondements de l'école du *Design Thinking* [19].

Le rôle particulier du temps doit être souligné. Sa maîtrise est sous-jacente aux définitions de l'ingénierie dans sa dimension de planification, traduisant le développement du productivisme (Boneville *et al.*, 2006). En outre, la durée allouée à un projet ne peut être assimilée aux ressources disponibles.

Voyons désormais comment l'ingénierie est concrètement conduite dans une situation d'urgence dans le cas précis du traitement des eaux contaminées. Notre analyse se base sur des sources ouvertes (présentations et rapports publics, sources médiatiques).

A partir de mars 2011, les cuves des réacteurs atteignant leur capacité de stockage maximale, TEPCO a cherché à mettre en place un système de recyclage de l'eau injectée pour le refroidissement. L'opérateur a fait appel à cette fin aux services d'industriels dont le français Areva, l'américain Kurion et les japonais Hitachi et Toshiba. Compte tenu des volumes d'eau à traiter, les industriels ne disposaient pas de solution préexistante. La société Areva a proposé à TEPCO d'adapter son système standard de décontamination pour utiliser des unités Actiflo / Multiflo développées par l'entreprise Véolia. De même, l'entreprise américaine Kurion a conçu un système spécifique pour le prétraitement du césium. Deux aspects se dégagent de ces interventions compte tenu des remarques liminaires sur la définition de l'ingénierie.

D'une part, la formulation du problème, le choix du radionucléide à traiter en priorité (le césium), le dimensionnement des équipements ou les évaluations des risques se sont appuyés sur une approche heuristique. Les chiffres clés ont été retenus à partir de données de l'expérience et les solutions

---

[17] Pour une description détaillée dans le cas du nucléaire : G. Sapy, *Introduction à l'ingénierie des installations nucléaires*, edp Sciences, 2012. Selon l'auteur, la principale spécificité du nucléaire en regard des autres systèmes techniques réside dans le niveau d'exigence des normes de contrôle qualité.

[18] Voir par exemple le projet wikispeed sur wikispeed.org.

[19] Brown T., « Design Thinking », *Harvard Business Review*, June 2008.

techniques ont été progressivement formalisées par « essais-corrections » : plusieurs méthodes ont ainsi été écartées à l'issue de ces tests. La solution déployée par Areva correspond à une méthode de traitement de la radioactivité éprouvée sur le site de Marcoule, qui a été adaptée pour pouvoir être appliquée avec un équipement prévu à l'origine pour la clarification des eaux usées (système Actiflo de Véolia). Ce dernier équipement, qui permet un traitement de grandes quantités d'eau, a dû être modifié en vue d'un usage en milieu radioactif avec des produits chimiques spécifiques. De même, la gestion de la radioprotection des équipes sur site a été planifiée à partir de différents types d'exposition aux polluants radiologiques. Mais les conditions d'exposition à la radioactivité ayant fortement évoluées durant les travaux, le niveau initialement visé de radioprotection offerte aux travailleurs sur le site a dû être revu, et les études d'ingénierie ont comporté une part d'incertitude significative.

D'autre part, les contraintes étaient fortes, à la fois en termes de temps, d'environnement et de ressources matérielles ou humaines. Ainsi, l'approche retenue par Areva avait pour objectif de tirer parti des ressources déjà disponibles au Japon telles que l'équipement Actiflo de Véolia. La mise au point du dispositif s'est déroulée en moins de trois mois et, dans cet intervalle, les équipes d'ingénierie ont dû conduire des études et simulations relatives à la sûreté et au génie civil notamment pour tenir compte de l'environnement marin et radioactif. Pour gagner du temps, les études ont été menées en parallèle autant que possible mais plusieurs problèmes ont émergé. Les gestionnaires du projet ont ainsi été confrontés à des incompatibilités du calendrier technique avec les dispositions juridiques visant à la protection des travailleurs. L'implémentation sur site a en outre été particulièrement difficile pour les équipes d'ingénieurs et de techniciens. La construction de l'unité Actiflo-Rad d'Areva a notamment mobilisé jusqu'à deux cents personnes sur le site portant un masque en permanence et les équipes ont du s'adapter pour respecter des délais courts et faire face aux contraintes de ressources. Parmi les autres contraintes, certaines modifications de l'équipement ont dû être réalisées directement sur le site et le travail a dû être organisé pour tenir compte de l'hostilité de l'environnement, ce qui à obliger à mettre en place un suivi médical spécifique. Selon Areva, cet environnement hostile et les difficultés de communication et de décision au sein d'équipes d'ingénieurs multiculturelles ont pesé sur la qualité de la finition des travaux.

Au final, le dispositif a pu être effectif à temps afin de prévenir le débordement des cuves et traiter le césium. Toutefois, son exploitation a été par la suite entrecoupée d'interruptions, ainsi en juillet 2011 de l'eau contaminée s'est échappée à la suite d'une conception inadéquate d'un joint en PVC reliant un tuyau à une conduite d'eau. Du point de vue de l'ingénierie des questions restent en suspens pour évaluer dans quelle mesure l'urgence a pesé sur les orientations prises. C'est le cas en ce qui concerne le problème du stockage des boues ou encore la coordination des différentes solutions industrielles. Sur ce dernier point, notons que les systèmes d'Areva et de Kurion se sont avérés successivement défaillants, interrompant le traitement de l'eau alors qu'ils pouvaient en partie être opérés de façon autonome. Cet exemple illustre dans quelle mesure l'ingénierie « classique » peut se trouver impactée par des facteurs nés d'une urgence. Des délais courts et une incertitude importante peuvent peser fortement sur les stratégies à adopter. Avant de préciser le concept « d'ingénierie de l'urgence », il convient donc de définir comment « l'urgence » détermine les objectifs de la stratégie d'ingénierie.

2.2 LA NOTION D'URGENCE

Selon les travaux de C. Roux-Dufort (Roux-Dufort, 2007) et de J. M. Albala-Bertrand (Albala-Bertrand, 2000), l'urgence naît d'une double prise de conscience :

- d'une part, qu'un scénario aux conséquences néfastes est très probable à court terme ;

- d'autre part, que seule une action rapide et mobilisant des ressources exceptionnelles est susceptible de prévenir ces dommages.

Cette prise de conscience de l'urgence repose sur la vision d'une échéance qui, compte tenu de son caractère extraordinaire, confronte ses acteurs aux limites de leurs ressources et savoir-faire. Le concept d'urgence impose donc de porter un regard réflexif au-delà des cadres organisationnels qui structurent l'activité quotidienne. Ces cadres reposent pour une large part sur une ritualisation liée aux procédures ainsi que sur un fractionnement des savoirs qui se traduit au niveau de l'organisation par une répartition des tâches et des compétences.

Une « organisation » est ici entendue comme une structure résultant d'une décision et matérialisée au minimum par une hiérarchie, des règles, un groupe (les « membres ») et des instruments de supervision et de sanction applicables à un périmètre d'activité dans un but déterminé (Ahrne *et al.*, 2010). Dans le champ de l'ingénierie, l'organisation inclut en outre des outils spécifiques de médiation (méthodologiques, matériels, informationnels, etc.). Le cadre formel qui enserre l'activité d'un système sociotechnique tend à rendre les ressources disponibles et la structure organisationnelle équivalentes. Le recensement des ressources disponibles et les stratégies de décision appliquées en situation d'urgence résultent ainsi d'une organisation spécifique. La contraction du temps et le manque de ressources peuvent alors entrer en conflit avec le déroulement standardisé de l'activité, jusqu'à sévèrement dégrader la performance dans laquelle l'organisation trouve sa justification.

En outre, le degré « d'urgence » est en partie déterminé par le contexte sociétal et, dans le cas de la sûreté nucléaire, par une impérieuse obligation d'agir face à une menace de contamination. Une organisation industrielle intègre alors avec plus ou moins d'intensité le caractère socialement inacceptable des conséquences potentielles envisagées en cas d'inaction. Soulignons qu'au sein d'une organisation, la décision est par essence personnifiée : les choix et les préférences des décideurs sont donc susceptibles d'être contestés (Ahrne *et al.*, 2010) et en cas d'urgence, doivent être légitimées auprès de groupes extérieurs à l'organisation.

Il s'ensuit que le contexte est celui d'une crise. La « crise », au plan managérial, se noue en effet autour de la difficulté à prendre une décision face à un événement perturbateur. La difficulté des décideurs à formuler leurs objectifs ou encore les dissensions entre les objectifs des différents acteurs alimentent alors le contexte de crise.

De notre point de vue, l'urgence joue le rôle de catalyseur d'un mouvement de recomposition de réseaux d'acteurs et d'organisations. Dans le cas de Fukushima-Daiichi cela concerne par exemple les populations exposées au risque, les autorités de sûreté ou encore les équipes d'ingénierie en charge de maîtriser le refroidissement des réacteurs et de contenir les rejets polluants. Ces acteurs vont se constituer et s'animer autour de valeurs partagées (éviter l'intolérable), et vont interagir à travers leurs représentations mises en exergue par la perception du danger et la pression temporelle. Dans ce contexte mouvant, il est possible que les acteurs de l'ingénierie soient confrontés à différents types d'obstacles. On peut notamment citer :

- l'absence de mémoire collective (par exemple lorsqu'ils font face à un événement inédit),
- l'insuffisance de modèles de référence (en cas de phénomène extrême),
- ou encore l'inadéquation des normes et standards qui encadrent habituellement leur travail (dans le cas d'un environnement physique représentant une menace exceptionnelle).

Pour les gestionnaires d'un projet d'ingénierie, la perception subjective de l'urgence se déclinera en trois objectifs d'égale importance : la maîtrise des délais (face à l'imminence d'une menace),

l'efficacité du produit (puisqu'il s'agit de réduire un risque) et la fiabilité du produit fini (pour ne pas créer de nouveaux risques).

2.3 DEFINITION DE « L'INGENIERIE DE L'URGENCE »

Comme nous l'avons vu, les méthodes d'ingénierie consistent en des stratégies d'optimisation d'un résultat, selon les ressources disponibles et sous couvert d'incertitude quant à la faisabilité technique du produit. Lorsque l'urgence pèse sur l'ingénierie, celle-ci peut se trouver confrontée à plusieurs types de difficultés :

- un état d'incertitude prononcé ;
- un manque crucial de ressources, dont le besoin peut croître rapidement avec l'hostilité de l'environnement, par exemple dans le contexte d'une catastrophe. L'hostilité de l'environnement se traduit en effet directement en termes de ressources disponibles pour l'accomplissement du projet (accès restreint à l'information, cadences de travail adaptées en fonction de la pollution radiologique, logistique rendue difficile, etc.). A cet égard, des dispositions juridiques trop rigides, par exemple en matière de radioprotection, peuvent limiter la disponibilité de ressources lors de situations critiques ;
- une forte exigence de performance vis-vis de la société, à la fois en termes de respect des délais, d'efficacité et de fiabilité particulière du produit fini. La solution « approximative » que l'ingénieur peut atteindre sera appréciée au regard de l'obligation d'agir qu'impose l'urgence.

Les stratégies de décision qui permettent de maximiser les résultats en fonction de l'une ou l'autre de ces contraintes peuvent s'avérer concurrentes et les décideurs sont susceptibles d'éprouver des difficultés à s'adapter aux évolutions de contexte nécessitant de réviser la stratégie initiale (Bettman *et al.,* 1996). Lorsque la pression temporelle s'accroît, les stratégies cognitives tendent à minimiser l'utilisation de ressources, tandis qu'une exigence d'efficacité ou de fiabilité favorise l'analyse en profondeur des solutions envisageables. L'exigence conjointe d'un respect de délais courts et d'une efficacité ou d'une fiabilité élevée constitue dès lors un obstacle dans l'élaboration d'une stratégie de décision. De même, pour lever une incertitude ou disposer de nouvelles approches heuristiques, des tests peuvent être conduits, mais s'engage alors une compétition entre la durée de l'expérimentation et le temps disponible pour faire face à l'urgence. Confronté au risque, le décideur peut également faire preuve d'une aversion à l'innovation (Bonneville *et al.,* 2006), alors que l'incertitude devrait l'inciter au contraire à explorer de nouvelles voies. L'application mutatis mutandis à une situation d'urgence de méthodes d'ingénierie conçues pour des projets soumis à moins de contrainte et d'incertitude est ainsi susceptible de faire échouer la stratégie retenue. On peut en particulier s'interroger sur la validité et la pertinence d'études de risque conduites selon une approche « classique » dans un contexte d'urgence. En cas d'innovation et de forte pression temporelle, le danger est d'éluder l'examen d'une faiblesse critique au regard de l'exigence sociétale au cœur de l'urgence. On pensera notamment au défaut du joint installé sur l'équipement Actiflo-Rad d'Areva (cf. supra § 2.1).

La notion « d'ingénierie de l'urgence » qualifie les activités d'ingénierie dont la conduite est entravée du fait des conditions d'urgence. Les marqueurs de l'urgence se ramènent ici à une tension entre une forte exigence socio-culturelle de performance et un manque de ressources immédiatement disponibles dans une situation incertaine. Notons que nous considérons les instruments de gestion, l'état des connaissances et le savoir-faire au plan technique en tant que dimension des ressources.

On peut donc définir l'ingénierie de l'urgence comme :

> *Une activité d'ingénierie dont la conduite est sérieusement perturbée par l'inadéquation des ressources face à une urgence sociétale.*

En fait l'ingénierie de l'urgence est une figure extrême de l'ingénierie, dont la mise en œuvre nécessite d'introduire un changement organisationnel spécifique à la gestion de ce type de projet.

En effet, les ressources, incluant l'état de l'art et des savoir-faire, ne constituent pas en soi un ensemble contraint à partir duquel il s'agit d'optimiser le résultat. Leur périmètre est au contraire modulable et devient un paramètre de contrôle de la fonction d'optimisation quitte à bouleverser les cadres organisationnels. En outre le produit fini doit présenter de fortes garanties de performance et susciter l'adhésion de la société civile. Sa conception doit impérativement respecter les délais imposés par l'urgence car une solution mise en œuvre suite à la manifestation d'une menace risque de s'avérer inefficace. Ces critères d'évaluation de la performance du produit s'imposent en grande partie à l'ingénieur. Au fond les contraintes tendent à s'imposer sur l'objectif ciblé.

Il s'agit donc d'innover en développant des méthodes d'organisation spécifiques qui garantissent la performance de l'ingénierie lorsque celle-ci intervient en tant que stratégie de gestion de la crise.

3 L'INGENIERIE DE L'URGENCE, UN NOUVEAU CONCEPT DE LA SURETE NUCLEAIRE

L'efficacité de l'ingénierie de l'urgence se mesure à la capacité d'une organisation, en situation de crise, à adapter ses méthodes de travail et ses modalités de management de l'ingénierie, pour répondre techniquement aux exigences sociétales induites par l'urgence (3.1). Afin d'être pleinement efficace, un tel concept doit donc s'appuyer sur un élargissement des cadres conceptuels de gestion de la sûreté. Il s'agit d'en faire un facteur d'accélération de l'entrée en résilience d'un système sociotechnique (3.2) et permettre de refonder les conventions à la base de la gestion du risque (3.3).

3.1 UNE CAPACITE D'ADAPTATION ORGANISATIONNELLE

Face à l'urgence, comme nous l'avons vu, l'organisation de l'activité d'ingénierie doit parfois se recomposer pour satisfaire une exigence sociétale de performance et dépasser certaines contradictions liées par exemple à l'inadéquation des outils ou à la division du travail. Dans un tel cas, il ne faut plus penser l'activité d'ingénierie dans un cadre conceptuel de « conduite de projet », mais dans celui d'une nouvelle organisation. Alors que la démarche de planification et de contrôle propre à la conduite de projet convoque les notions « d'outils » et « d'utilisateurs » et se focalise sur le respect d'une chronologie, la notion « d'organisation » renvoie elle à des boucles « attentes – actions - apprentissages » inhérentes à la présence d'individus en interaction (Packendorff, 1995). Le potentiel de création et d'adaptation ne peut être libéré qu'à condition d'adopter une nouvelle organisation (et les modes de management associés) spécifique à l'activité d'ingénierie de l'urgence. Par exemple, les industriels impliqués pour élaborer le dispositif de traitement des eaux à Fukushima-Daiichi ont modifié certaines de leurs conditions de travail et ont agi au-delà de leurs cadres organisationnels ordinaires en mobilisant les ressources nécessaires. Leurs initiatives expriment un besoin qui aurait justifié la mise en œuvre d'une organisation spécifique à l'ingénierie de l'urgence. Ils ont cependant opté pour une méthode de conduite de projet sous forte contrainte temporelle et non dans la perspective d'un changement temporaire d'organisation. Ce choix a certainement limité leur capacité à prévenir les défaillances mentionnées précédemment et les a sans doute incité à résumer l'exigence sociétale de performance au respect des délais. En résumé la

notion « d'ingénierie de l'urgence » est un concept qui doit être pris en compte par les acteurs opérationnels pour formaliser le changement de l'organisation de l'ingénierie lorsque l'urgence l'oblige.

La mise en œuvre efficace d'une ingénierie de l'urgence requiert au préalable de définir la finalité même de l'activité : outre la création d'une solution technique en prévention d'un péril, le résultat de l'activité d'ingénierie de l'urgence doit emporter l'adhésion de la société civile. Une solution technique apportera une réponse efficace à un péril imminent dans la mesure où sa performance face aux caractéristiques du risque est « socialement acceptable ». En amont l'ingénierie de l'urgence débute par une phase de formalisation du problème posé et cette étape implique aussi une part d'approximation. A ce stade, la prise en compte des attentes de la société civile est déterminante dans la réussite du projet. Dans cette perspective l'objet de l'activité d'ingénierie induit un élargissement des communautés d'acteurs impliqués à travers un questionnement sur le véritable sens de l'activité (Engeström, 2011) qui doit aussi s'insérer dans son environnement sociétal. A titre d'exemple, le choix de traiter en priorité le césium pour le traitement de l'eau à Fukushima-Daiichi a finalement été jugé insuffisant et d'importants travaux d'ingénierie ont suivi pour concevoir un système de traitement de la quasi- totalité des radionucléides. Le retard dans la mise en service de ce dernier dispositif, qui a subi de nombreuses défaillances au cours des tests, constitue un facteur critique d'appréciation. Pour ces travaux, l'objet de l'activité des ingénieurs a été entre autres matérialisé par un ensemble de « taux-cibles » de décontamination de l'eau. L'expansion de cet objet aurait pu consister à définir ces taux selon les attentes des populations concernées facilitant ainsi la perspective d'un rejet en mer.

Face à cet objet reformulé, l'insuffisance des ressources au sens large (moyens matériels, méthodes, informations, etc.), l'inadéquation de la division du travail et l'élargissement des communautés impliquées justifient alors un changement d'organisation afin que celle-ci ne se réduise pas à une conduite de projet dans un contexte d'urgence. Dans le cadre d'un tel changement de paradigme, la finitude de l'horizon temporel est une limite bien plus mobilisatrice que celles fixées par les outils usuels de planification de projets. Par conséquent dès qu'elle devient une composante stratégique de l'organisation, l'activité d'ingénierie de l'urgence, nécessairement conduite selon une organisation de type « temporaire » (au sens de Lundin *et al.,*1997) , doit prendre en compte son caractère éphémère. Elle n'existe en effet qu'à l'intérieur d'une fenêtre de temps définie par l'urgence et disparaît avec elle.

La nouvelle organisation doit en particulier permettre de faire émerger de nouvelles ressources pour répondre aux exigences de l'opinion publique. Notons que le besoin d'élargissement des ressources peut découler d'un contexte de catastrophe : du fait du dépassement des référentiels d'ingénierie, le système sociotechnique étudié peut se trouver dans un état imprévu lorsque survient la situation d'urgence, car son activité se retrouve fortement perturbée voire interrompue du fait de la destruction de fonctions essentielles. L'organisation doit ainsi favoriser l'innovation sous contrainte temporelle pour élargir le champ des possibles. L'innovation recouvre ici un processus multiforme qui inclut la création de nouvelles méthodes ou instruments d'ingénierie, l'adaptation de ressources existantes ou encore le sondage de ressources connexes. L'enjeu sociétal des projets d'ingénierie dans une situation d'urgence constitue à cet égard un objet suffisamment porteur de sens pour que des potentiels de créativité puissent s'exprimer. A contrario, lorsque l'organisation industrielle en vigueur permet de concevoir des solutions pleinement satisfaisantes sur un plan sociétal compte tenu de l'état de l'art et des moyens immédiatement disponibles, les travaux entrent dans le cadre

de l'ingénierie « classique » y compris en situation d'urgence [20]. Soulignons qu'un changement adéquat d'organisation et un élargissement de l'objet de l'activité vers une attente sociétale peuvent aussi permettre d'atténuer le risque de critique dont fait naturellement l'objet une décision personnifiée dans une structure hiérarchisée (cf. supra § 2.2).

La capacité d'un industriel à s'adapter pour garantir la performance de travaux d'ingénierie de l'urgence peut donc s'évaluer selon au moins trois critères, soit : sa capacité à élargir l'objet de son activité pour intégrer les attentes de la société civile ; sa capacité à changer temporairement son organisation en fonction de cet objet ainsi reformulé ; et enfin sa capacité à favoriser par cette nouvelle organisation une innovation pourvoyeuse de ressources. Ces trois critères participent d'une accélération de l'entrée en résilience face à une situation extrême.

3.2 ACCELERER L'ENTREE EN RESILIENCE

Aucun retour d'expérience ne peut aboutir à un référentiel sans faille (Quarantelli, 1986), et cela serait une erreur de vouloir être exhaustif dans la description des scénarios de dysfonctionnement ou encore de surestimer la performance des agents en situation de crise [21]. Tout opérateur est irrémédiablement exposé au risque de dépassement de ses cadres déterministes de gestion de la sécurité. Pour prévenir les conséquences d'une telle occurrence, il s'agit d'améliorer la robustesse globale du système sociotechnique dès les premières manifestations de la catastrophe.

Paradoxalement une approche déterministe de la sécurité dramatise l'incertitude : face à une volonté de créer de l'ordre, l'introduction du désordre est déstabilisante. La capacité d'une organisation industrielle à entrer en résilience à l'issue d'un accident dépend de sa capacité à basculer au plus vite d'un mode de fonctionnement normal et stabilisé à un mode plus adaptatif et innovant afin d'assurer des fonctions vitales. Le système dont la survie est menacée se trouve confronté à un paradoxe : il doit trouver des solutions efficaces alors que ses ressources ont été en partie détruites par l'accident. Sa stratégie d'entrée en résilience consiste à reconfigurer son organisation et ses stratégies de décision pour optimiser la disponibilité de l'ensemble des ressources dont il dispose, y compris celles qui ne se dégagent que par une dynamique créative.

En contre-exemple d'une attitude résiliente, nous pouvons mentionner les problématiques du site japonais concernant la restauration de l'alimentation électrique des vannes de dépressurisation SRV [22]. Les personnels ont en effet éprouvé de grandes difficultés à improviser des sources d'alimentation telles que des groupes électrogènes mobiles ou des batteries de voitures. L'exemple de Fukushima-Daiichi démontre qu'un retard ou une déficience dans la conduite des travaux d'ingénierie est en soi un facteur aggravant de la crise, car cela génère de nouveaux risques et érode la confiance des populations. Bien que ne constituant qu'un volet des opérations potentiellement conduites en situation catastrophique, l'activité d'ingénierie peut apporter une contribution essentielle que ce soit par le rétablissement de fonctions nécessaires au pilotage des réacteurs ou par la conception de moyens de lutte contre les rejets polluants. Or, entre une action héroïque incertaine et une intervention selon une stratégie outillée, la performance de l'ingénierie en réponse à une urgence est conditionnée par la préparation de l'organisation. C'est la raison pour laquelle, au-

[20] Cela distingue nettement les travaux sur l'ingénierie de l'urgence d'autres recherches sur les méthodes de conduite de projet d'ingénierie en vue de pallier une défaillance critique dépassant le cadre des opérations de maintenance, cf. Wearne S. H., «Management of Urgent Emergency Engineering Projects », *Proceedings of the ICE – Municipal Engineers*, Vol. 151, issue 4, 1 December 2002.

[21] Dans le cadre des travaux du groupe de travail sur les facteurs humains et organisationnels, cf. AEN, 2013, op. cit.

[22] Safety Relieve Valve (Vanne de décharge de sécurité).

delà de ressources d'ingénierie en situation de crise planifiée par certains industriels, il nous semble nécessaire d'introduire des méthodes de travail spécifiques à un objectif d'entrée en résilience.

3.3 REFONDER LES CONVENTIONS

Les enseignements de Fukushima-Daiichi ont permis de consolider les référentiels de sûreté. Les exigences relatives aux performances des équipements critiques et de leurs opérations ont notamment été étendues, tout en confirmant le concept de « défense en profondeur » [(23)]. Cette approche a démontré son efficacité et il est pertinent pour les autorités de surveillance de viser, en premier lieu, une mise en œuvre effective des préceptes associés. Le corpus normatif fournit alors à la fois le périmètre des risques et les moyens à mettre en œuvre pour les maîtriser. Mais cette approche ne favorise pas, en tant que telle, une aptitude à la résilience. Nous proposons à cette fin d'introduire des considérations organisationnelles au champ des défenses en profondeur permettant de faire face à des situations « hors scénarios ». L'ingénierie de l'urgence est en effet un mode opératoire qui doit permettre à un système sociotechnique, initialement démuni, de prendre le contrôle de la mécanique des faits sur un plan technique dans un contexte qui lui fait subir un traumatisme et annihile ses moyens d'action.

Ces réflexions épistémiques impliquent en réalité un changement radical dans une organisation, en particulier dans le cas d'une centrale nucléaire. Les principaux bouleversements doivent s'opérer au sein de la culture de sécurité et de l'appréhension des rôles dans la gestion du risque. Dans des conditions de dégradation qui appellent une ingénierie de l'urgence, il ne s'agit pas d'activer des moyens techniques par l'application de procédures préétablies mais au contraire de développer des modes opératoires spécifiques, c'est-à-dire des possibilités de reconfiguration de l'organisation de l'ingénierie et des outils de gestion associés, en fonction du contexte d'urgence. La mise en œuvre de l'ingénierie de l'urgence peut impliquer des changements dans les procédures de prise de décision, une nouvelle répartition des rôles au sein des organisations d'ingénierie et la formalisation d'indicateurs de gestion de projet adaptés aux conditions d'intervention, de conception et de réalisation. C'est ensuite aux acteurs de la crise ainsi réorganisés d'infléchir la dynamique de la catastrophe vers une issue favorable, en mettant en œuvre, le cas échéant, des moyens *ad hoc*.

Il est par conséquent envisageable que les autorités en charge de la surveillance de la sûreté nucléaire exigent des exploitants qu'ils démontrent leur aptitude à mettre en œuvre efficacement une stratégie d'ingénierie de l'urgence et, plus généralement, qu'ils fassent la preuve de leur habileté (savoir-faire, expertises, méthodes, etc.) en la matière pour, de fait, garantir une entrée rapide en résilience. L'objectif que devrait atteindre un exploitant et, au-delà de son propre cas, toute la communauté qui encadre son activité, n'est plus seulement de contenir les défaillances critiques : sa performance en matière de sécurité devrait être jugée à l'aune de la capacité d'adaptation de son ingénierie. Cette capacité d'adaptation devrait permettre de recouvrer certaines fonctions déterminantes après un bouleversement d'ampleur, que celui-ci ait été prévu ou non, qu'il s'avère irrésistible ou qu'il eût pu être maîtrisé par la mise en œuvre de l'état de l'art.

Cette exigence à l'endroit des exploitants devrait être assortie d'un assouplissement circonstancié des dispositions procédurales en matière de délivrance des autorisations d'exploitation ou d'exercice des fonctions de surveillance. En cas de situation grave, l'exploitant devrait être habilité à déroger à certaines normes juridiques destinées à protéger un intérêt individuel, lorsque celles-ci menacent sérieusement d'entraver la préservation de l'intérêt général. Ces situations doivent demeurer exceptionnelles et faire l'objet d'un contrôle approprié, le cas échéant *ex post factum*.

[(23)] Source : AEN, op. cit.

Apportons enfin une justification d'ordre sociétale à la mise en œuvre de ce nouveau concept. Les ressources mobilisées par l'État japonais et l'opérateur TEPCO pour sécuriser le site de Fukushima-Daiichi sont à mettre en regard de leur pertinence. Certains experts considèrent que le taux de contamination des eaux de Fukushima justifierait sans risque excessif un rejet dans la mer [24]. Mais, au-delà de toute considération essentiellement technicienne, la nécessité de garantir un « risque zéro » de pollution est devenue un enjeu sociétal. Les dysfonctionnements des systèmes de traitement des eaux contaminées, constatés peu après leurs entrées en service, ont certainement pesé dans le rejet par les populations des risques que causeraient à l'environnement un reflux dans la mer des eaux traitées. Désormais, des moyens humains, matériels et financiers considérables sont déployés pour prévenir les risques de rejet radioactif générés par le traitement des eaux contaminées, au détriment, vraisemblablement, de la gestion d'autres risques. Un cadre déterministe expose le décideur à une incompréhension des populations en cas de faillite de ses mesures de sécurité. Dans un contexte d'urgence, la capacité à s'adapter et à répondre efficacement aux problèmes techniques nouveaux est alors un gage d'adhésion du public et de la communauté internationale. En maîtrisant mieux la performance de l'ingénierie de l'urgence face à un risque, il est envisageable en retour de mieux maîtriser « la mise en société » de ce risque, dans une perspective d'optimisation des ressources allouées à la prévention.

4 CONCLUSION

En matière nucléaire, les référentiels d'ingénierie définissent le domaine de l'acceptable. Les défaillances sont répertoriées puis associées à des mesures de prévention, elles-mêmes déclinées en exigences de performance d'ingénierie en termes de conception ou d'exploitation. Face à ces tentatives pour créer de la certitude, l'urgence révèle les limites et les errements des décisions prises.

La situation sur le site de Fukushima-Daiichi a mis en évidence une autre fonction potentielle de l'ingénierie. En complément d'une sécurité encadrée par des normes, élaborées au stade premier de la conception, voire de la réglementation, se dessine l'opportunité d'une ingénierie en situation d'urgence visant à contenir les risques d'un système sociotechnique tandis que certaines de ses fonctions essentielles ont été détruites ou sont menacées. Le défi est alors d'intégrer une dimension sociétale dans l'activité d'ingénierie pour ne pas la réduire à l'expression chiffrée d'une analyse essentiellement technicienne. Le changement temporaire d'organisation doit aussi offrir un cadre managérial permettant de faire émerger de nouveaux potentiels d'innovation dans un contexte d'urgence. L'enjeu est stratégique car une ingénierie performante en situation d'urgence est susceptible d'accélérer l'entrée en résilience d'un système bouleversé par une catastrophe.

Ces premières considérations sur le concept d'ingénierie de l'urgence invitent à une réflexion de fond sur la notion de résilience et les moyens de la concrétiser. Concevoir la résilience implique des références conceptuelles adéquates, capables de rendre compte des évolutions d'un système en situation d'urgence. Si les modèles de sécurité traditionnels [25] fournissent des éléments pour décrire une séquence conduisant à un dommage et pour positionner les mesures de prévention en fonction de la propagation de défaillances, ils ne permettent pas de représenter un état du système étudié ou

[24] Lake H. Barrett, « Fixing Fukushima's Water Problem », *The Bulletin of Atomic Scientist*, 9 September 2013, disponible en ligne : thebulletin.org

[25] Ces modèles sont dérivés pour une large part du modèle des accidents organisationnels de Reason (Reason J., *Managing the Risks of Organizational Accidents*, Ashgate, 1997).

son évolution en particulier sur une période prolongée face à une catastrophe. En raison de cette difficulté, il peut s'avérer encore délicat de mesurer la portée des événements en cours sur le site de Fukushima-Daiichi. Nous devons donc renouveler nos outils conceptuels afin de réaliser la synthèse des événements qui s'enchaînent depuis le 11 mars 2011 et apprendre à penser l'accident « qui n'en finit plus ».

5 RÉFÉRENCES

AIEA: Mission Report – IAEA International Peer Review Mission on Mid-and-Long-Term Roadmap towards the Decommissioning of TEPCO's Fukushima-Daiichi Nuclear Power Station Units 1-4, 25 November – 4 December 2013.

AEN: The Fukushima-Daiichi Nuclear Power Plant Accident – OECD/NEA Nuclear Safety, Response and Lessons learnt, 2013, NEA n° 7161.

Ahrne G., Brunsson N., 2010, « L'organisation en dehors des organisations, ou l'organisation incomplète », Le libellio d'AEGIS, Vol. 6, n° 1, p. 1-18, printemps 2010.

Albala-Bertrand J.M., 2000, « What is a « Complex Humanitarian Emergency »?, An Analytical Essay », Working Paper N° 420, Queen Mary University of London, October 2000.

Bettman J. R, Luce M. F., Payne J.W. , 1996, « When Time is Money: Decision Behavior Under Opportunity-Cost Time Pressure », Organizational Behavior and Human Decision Processes, Vol. 66, N 2, p. 131-152, May 1996.

Bonneville L., Grosjean S., 2006, "L'"Homo-Urgentus" dans les organisations: entre expression et confrontation de logiques d'urgence", Communication & organisation, n°29, p. 23-47.

Brown T., 2008, « Design Thinking », Harvard Business Review, June 2008.

Carlsen K., Fink C., 1978, « Operating under Stress and Strain », IEEE Spectrum, pp. 48-53, March 1978.

Engeström Y., 2011, « Théorie de l'activité et management », Revue Management & Avenir, n° 42, p. 170-182, 2011 (2).

Fujita Y., Hollnagel E., 2013, « The Fukushima Disaster – Systemic Failures as the Lack of Resilience », Nuclear Engineering and Technology, Vol. 45, n° 1, pp. 1-8, February 2013.

Hollnagel, E., Leveson, N., Woods, D.D., 2005, Resilience Engineering. Concepts and Precepts, Aldershot, UK: Ashgate.

Koen B. V., 1985, Definition of the Engineering Method, American Society for Engineering Education, Washington.

Lake H. B., 2013, « Fixing Fukushima's Water Problem », The Bulletin of Atomic Scientist, 9 September 2013, available on line: thebulletin.org

Lundin R., Söderholm A., 1995, « A Theory of the Temporary Organization », Scandinavian Journal of Management, Vol. 11, n°4, pp. 437-455, December 1995.

Packendorff J., 1995, « Inquiring Into the Temporary Organization: New Directions for Project Management Research », Scandinavian Journal of Management, Vol. 11, n° 4, pp. 319-333, December 1995.

Quarantelli E. L., 1986, « Disaster Crisis Management », Preliminary Paper n° 113, International Conference on Industrial Crisis Management, New-York, September 6th 1986.

Reason J., 1997, Managing the Risks of Organizational Accidents, Ashgate, 1997.

Roux-Dufort C., 2007, « Is Crisis Management (Only) a Management of Exceptions? », Journal of Contingencies and Crisis Management, Vol. 15, n° 2, p. 105-114, juin 2007.

Sapy G., 2012, Introduction à l'ingénierie des installations nucléaires, edp Sciences.

TEPCO, 2013, Progress Status and Future Challenges of Mid-to-long Term Roadmap towards the Decommissioning of Units 1-4 of TEPCO Fukushima Daiichi Nuclear Power Station (Outline), mise à jour du 28 novembre 2013.

TEPCO, communiqué de presse du 20 janvier 2014, Water Flow Identified at First Floor of Unit 3 Reactor Building -Water which flows from near the Main Steam Isolation Valve Room to the Drainage Ditch on the Floor.

Vayssier G., 2012, « Present Day EOPS and SAMG: Where Do We Go From Here? », Nuclear Engineering & Technology, Vol. 44, n°3, pp. 225-236, April 2012.

Wearne S. H., 2002, «Management of Urgent Emergency Engineering Projects », Proceedings of the ICE – Municipal Engineers, Vol. 151, issue 4, 1 December 2002.

Notes

FUKUSHIMA-DAIICHI, LE TEMPS DE L'INGÉNIERIE DE L'URGENCE.

Mots-clés : accident nucléaire, ingénierie de l'urgence, défense en profondeur, urgence, ingénierie

Résumé

Le retour d'expérience de l'accident de Fukushima-Daiichi a mis l'accent sur les mesures de prévention destinées à protéger les réacteurs nucléaires ainsi que sur les méthodes de gestion de crise classiquement convoquées. Cependant, les conditions sur le site relèvent d'un accident qui n'en finit plus. Après les événements du 11 mars 2011, la manière dont sont conduites les opérations d'ingénierie visant à sécuriser les installations offre une nouvelle perspective sur la capacité des organisations à s'adapter à des situations qui vont bien au-delà des cadres déterministes. Dans cet article, nous examinons cette figure extrême de l'ingénierie, dénommée « ingénierie de l'urgence ».

Franck GUARNIERI
MINES ParisTech
CRC - Centre de recherche sur les Risques et les Crises
rue Claude Daunesse, CS 10207
06904 Sophia Antipolis Cedex, France

Sébastien TRAVADEL
MINES ParisTech
CRC - Centre de recherche sur les Risques et les Crises
rue Claude Daunesse, CS 10207
06904 Sophia Antipolis Cedex, France