

PRISE EN COMPTE DU « FACTEUR HUMAIN » DANS LES ETUDES DE DANGERS DE BARRAGES D'EDF

Taking the human factor into account in EDF's dam hazard studies

Denis VERNEY

EDF Centre d'Ingénierie Hydraulique
Savoie Technolac 73290 La motte Servolex
denis.verney@edf.fr

Justin LAROUZEE

CRC Centre de recherche sur les Risques et les Crises, MINES Paris – PSL
1 rue Claude Daunesse, CS10207 06904 Sophia-Antipolis Cedex
justin.larouzee@minesparis.psl.eu

MOTS CLEFS

Facteur humain, ECHO, Méthodologie, Erreur, Cotation, Organisation, Etude de danger

KEY WORDS

Human factor, ECHO, Methodology, Error, Quotation, Organization, Hazard study

RÉSUMÉ

Depuis l'origine de l'aire industrielle, la prise en compte de la performance et de l'erreur humaine dans les processus industriels a fortement évolué. La manière d'être formé, de travailler, de s'organiser ainsi que les conditions de travail ont progressé tout autant que les différentes technologies et que la perception des enjeux humains. L'univers des barrages n'échappe pas à ces évolutions. Dans les études de dangers (EDD), les actions humaines inappropriées peuvent constituer des événements initiateurs (EI) à l'évènement redouté central (ERC). Cela peut être, par exemple, le cas d'une ouverture intempestive de vanne, induisant des phénomènes dangereux ou bien des non-ouvertures de vanne contribuant à l'atteinte d'une cote de vulnérabilité ou de danger. Dans les EDD de première génération, ces événements initiateurs étaient appelés « Erreur humaine » et l'analyse se focalisait sur la recherche des possibilités d'erreurs pouvant être commises par l'intervenant. Cette approche réductrice focalise sur l'individu comme source d'erreur, ne tient pas compte des paramètres sociaux organisationnels et oublie que si l'homme est capable de commettre des erreurs, il est aussi capable de rattraper des situations dans certaines configurations. Dans les EDD de deuxième génération, les EI impliquant le facteur humain sont appelés « Evènement Socio-Organisationnel et Humain » (EI SOH). Pour parvenir à coter la probabilité d'occurrence de ces événements initiateurs EDF a conçu une méthode spécifique aux barrages. Cette méthode, baptisée « ECHO » (Evaluation et Cotation des dimensions Humaines et Organisationnelles) s'inspire, sur le plan conceptuel, des travaux de James Reason sur les accidents organisationnels et sur le plan pratique, des travaux d'Erik Hollnagel avec la méthode CREAM qui postule que la défaillance de l'action dépend des conditions dans lesquelles elle est réalisée. Cette communication présente tout d'abord un historique de la prise en compte du facteur humain, puis la genèse de la méthode ECHO, ses grands principes méthodologiques (en particulier les 9 dimensions qui sont observées sur le terrain et l'approche qui permet de proposer une cotation des EI SOH). Enfin, les axes d'amélioration future sont discutés.

ABSTRACT

Since the early days of the industrial era, human performance and human error have played a key role in industrial processes. The way people are trained, the way they work, the way they organize themselves and their working conditions have progressed just as much as the various technologies and the perception of human issues. The world of dams is no exception to these changes. In hazard studies (EDD for the French Etudes de Dangers), inappropriate human actions can constitute initiating events (EI for the French Evènement Initiateur) to the central dreaded event (ERC for the French Evènement Redouté Central). This may be the case, for example, of an untimely valve opening, leading to dangerous phenomena, or of valve non-openings contributing to the attainment of a vulnerability or danger rating. In first-generation SDEs, these initiating events were referred to

as “human error”, and the analysis focused on identifying possible errors that could have been committed by the responder. This reductionist approach focuses on the individual as the source of error, ignores social and organizational parameters, and overlooks the fact that, while human beings can make mistakes, they are also capable of overcoming situations in certain configurations. In second-generation ESDs, hazards involving the human factor are referred to as “Socio-Organizational and Human initiating event” (EI SOH). To rate the probability of occurrence of these initiating events, EDF has devised a specific method for dams. This method, known as “ECHO” (Evaluation et Cotation des dimensions Humaines et Organisationnelles) is conceptually inspired by James Reason's work on organizational accidents, and practically by Erik Hollnagel's CREAM method, which postulates that the failure of an action depends on the conditions under which it is carried out. This paper begins with an overview of the history of taking the human factor into account, followed by the genesis of the ECHO method and its main methodological principles (in particular, the 9 dimensions observed in the field and the approach used to propose a rating for SOH hazards). Lastly, future areas for improvement are discussed.

1. INTRODUCTION

Le facteur humain est une des composantes importantes dans les EDD. Contrairement à d'autres composantes, plus techniques, qui peuvent être abordées par des approches calculatoires, mesurées ou estimées de façon déterministe, le domaine humain relève de composantes non-déterministes et pour parties inaccessibles à la mesure directe, liées au fonctionnement des cerveaux individuels et à la complexité des interactions humaines et sociales. Dans les EDD, il est cependant nécessaire de comprendre et d'apprécier les risques qu'une mauvaise performance humaine peut faire peser sur l'ouvrage. La méthode ECHO (Evaluation et Cotation des Humaines et Organisationnelles) a été développée par EDF sur la base d'une méthode moderne intégrant les dernières avancées du domaine socio-organisationnel et humain. L'objet de cet article est d'exposer la genèse de la conception de la méthode ECHO, en l'intégrant dans l'évolution historique de la prise en compte du facteur humain dans l'industrie ; puis d'en présenter les bases théoriques et méthodologiques pour en expliciter l'utilisation et le fonctionnement.

2. ETUDES DE DANGERS : CADRE REGLEMENTAIRE, CONTENU, LIEN SOH

Cette partie présente succinctement le cadre réglementaire des EDD (2.1), leur contenu et les grands principes d'analyse de risques qui les régissent (2.2) pour expliciter le cadre dans lequel il est nécessaire de penser la prise en compte des dimensions SOH au sein de ces études (2.3).

2.1 Cadre réglementaire

En France, la réglementation des EDD des barrages vise à garantir la sécurité des personnes et des biens. Ce cadre réglementaire repose principalement sur le code de l'environnement et le code de l'énergie. L'arrêté du 12 juin 2008, modifié par l'arrêté du 3 septembre 2018, définit les exigences pour les études de danger des barrages. Ces études doivent être réalisées pour tous les barrages de classe A et B, et actualisées tous les 10 ans pour les barrages de classe A et tous les 15 ans pour ceux de classe B.

Un agrément ministériel est nécessaire pour conduire ces études. EDF-CIH et EDF-DTG sont agréés pour réaliser ces études sur les barrages (et conduites forcées).

2.2 Contenu d'une EDD

Les EDD comportent plusieurs volets ; examen exhaustif permettant de faire un bilan d'état, conformité aux exigences réglementaires et analyse de risques. A l'issue de l'instruction de ces différents volets, des mesures correctives de prévention sont préconisées si nécessaires. L'analyse de risques est un élément central de l'étude de dangers car elle permet de prononcer l'acceptabilité ou non des risques et elle permet aussi d'instruire la conformité à certains points d'exigence de la réglementation. Cette analyse de risques est conduite méthodiquement et itérativement selon plusieurs étapes. Premièrement, l'analyse préliminaire des risques (APR), qui passe en revue méthodiquement tous les éléments de l'ouvrage qui retiennent de l'eau et statue, dans toutes les configurations d'exploitation envisageables, si un risque existe et, si c'est le cas si ce risque constitue un ERC ou un EI. Deuxièmement, l'analyse Détaillée des Risques (ADR) qui permet pour chaque événement retenu à l'APR d'identifier les événements initiateurs et les modes de rupture associés de toutes natures (identification des risques liés à la conception et l'état du matériel, identification des risques extérieurs qui

peuvent aggraver l'ouvrage y compris les aléas naturels, identification des risques liés à l'exploitation de l'ouvrage dont les risques liés aux pratiques des intervenants et à l'organisation...). Les scénarios correspondant à chacun de ces risques sont alors déterminés permettant pour chacun d'associer une probabilité d'occurrence, un mode de défaillance, des conséquences potentielles.

2.3 Prise en compte des dimensions socio-organisationnelles

Certains des scénarios conduisant à des effets redoutés (ERC), notamment lorsqu'il s'agit de manœuvres de vannes, peuvent avoir pour origine une action humaine inappropriée : non-ouverture ou ouverture intempestive d'une ou plusieurs vannes, non-fermeture ou fermeture intempestive. Il s'agit, dans la nomenclature des EDD reposant sur les diagrammes nœud papillon [1] d'événements initiateurs.

Comme pour l'ensemble des autres événements initiateurs, ces événements liés au facteur humain doivent faire l'objet d'une cotation, c'est-à-dire une évaluation de leur probabilité d'occurrence. Dans le cadre de l'approche semi-quantitative retenue pour les EDD de barrages, il s'agit donc de déterminer une classe d'occurrence associée aux événements initiateurs retenus à l'analyse préliminaire de risques et liés aux facteurs organisationnels et humains. Les classes d'occurrence semi-quantitatives possibles dans les EDD de barrages sont exprimées par des lettres et peuvent varier de A1 à E (Tableau 1).

Tableau 1 : classes d'occurrence et leurs équivalences probabilistes ainsi que leurs expressions qualitatives.

Niveau de fréquence *	E Inférieur à 10-5 Possible ** mais extrêmement peu probable	D De 10-4 à 10-5 Très improbable	C De 10-3 à 10-4 Improbable	B De 10-2 à 10-3 Probable	A2 De 10-1 à 10-2 Courant	A1 De 1 à 10-1 Très Courant
Qualitative	N'est pas impossible au vu des connaissances actuelles mais non rencontré au niveau mondial sur un très grand nombre d'années installations	S'est déjà produit dans ce secteur d'activité mais a fait l'objet de mesures correctives réduisant significativement sa probabilité	Un événement similaire déjà rencontré dans le secteur d'activité ou dans ce type d'organisation au niveau mondial, sans que les éventuelles corrections intervenues depuis apportent une garantie de réduction significative de sa probabilité	S'est déjà produit et/ou peut se produire pendant la durée de vie de l'installation	Se produit une à plusieurs fois dans la vie de nombreux ouvrages similaires	Se produit très régulièrement dans la vie de pratiquement tous les ouvrages similaires $0.1 < p < 1$

* Dans les EDD de barrages on utilisera préférentiellement l'expression « classe d'occurrence ».

** au sens : « physiquement possible », « ne peut être exclu ».

En 2008, dans les toutes premières EDD conduites par le CIH, avec une approche conservatrice d'ingénieur et les contraintes de ressource et de temps, les événements initiateurs impliquant le facteur humain étaient qualifiés « d'erreur humaine » et cotés en A ou B.

Pour cibler au plus juste le choix de la classe de cotation, garder une cohérence et une homogénéité, le CIH a entrepris de développer une méthode spécifique aux EDD de barrages, qui intègre les principaux paramètres socio-organisationnels et humains susceptibles d'influencer la performance d'un opérateur. Ces travaux conduits en collaboration avec l'école des MINES de Paris – PSL (Université Paris Sciences et Lettres), dans le cadre d'une thèse de doctorat, ont conduit au développement de la méthode ECHO [2] qui a été validée et déployée en 2015. Cette méthode permet notamment la cotation des EI-SOH sur la plage allant de A1 à C et ouvre la porte à des cotations dans des classes d'occurrence supérieures, moyennant les justifications *ad hoc*. Depuis 2015, la méthode ECHO fait l'objet d'ajustements et d'aménagements. Ainsi depuis 2022, un complément a été apporté pour permettre d'atteindre la cotation D de manière cohérente et homogène.

3. HISTORIQUE DE LA PRISE EN COMPTE DU « FACTEUR HUMAIN » DANS L'INDUSTRIE

Au cours de l'ère industrielle la prise en compte des aspects humains a fortement évolué. L'individu a d'abord été considéré comme maillon faible et « fautif » au 19^e siècle (3.1) que les ingénieurs ont cherché à cadrer et contrôler jusqu'au milieu du 20^e siècle (3.2). Après la seconde guerre mondiale, les travaux en

ergonomie et psychologie au travail ont ouvert la voie à l'étude scientifique du facteur humain (3.3). Depuis les années 1980 et au tournant des années 2000 (3.4) il est admis que ses actions sont largement dépendantes des structures et organisations complexes dans lesquelles il agit. Ces évolutions ont été guidées par le contexte industriel, l'avancée des technologies mais surtout par des événements, crises ou catastrophes qui ont permis de mieux comprendre le fonctionnement humain au sens large. Pour comprendre les fondements et l'approche proposée par la méthode ECHO, il est nécessaire de la mettre en perspective avec ces évolutions et d'avoir à l'esprit la théorie de l'accident organisationnel, popularisée par le modèle du fromage Suisse (3.5). Cette section propose donc un aperçu historique de la prise en compte de l'humain dans la sécurité industrielle.

3.1 L'émergence de la période industrielle jusqu'à la première guerre mondiale

La première révolution industrielle (période du mi-18^e au mi-19^e siècle) correspond au passage de l'aire à dominante agricole et artisanale, à une société industrielle. La seconde révolution industrielle (jusqu'en 1914) correspond à l'émergence de nouvelles technologies révolutionnaires (électricité, moteur à combustion, acier, ...) et la naissance des premières chaînes de production. Durant cette période, les premières études sur les accidents du travail commencent à émerger, mais les erreurs humaines sont souvent attribuées à la négligence individuelle.

En 1862, l'accident ferroviaire de Clayton Tunnel en Angleterre¹, l'accident s'est produit lorsque trois trains se sont suivis de près sur la ligne principale de Brighton. Le premier train est entré dans le tunnel sans problème, mais le signal automatique ne s'est pas remis en position de danger après son passage. Le signaleur a tenté de corriger la situation, mais des erreurs de communication et de jugement ont conduit à une collision entre le deuxième et le troisième train dans le tunnel. Les mesures prises à l'issue de l'analyse étaient :

- La nécessité de systèmes de sécurité qui peuvent compenser les erreurs humaines et les défaillances techniques.
- L'importance de la formation continue et de la préparation des opérateurs pour gérer les situations d'urgence.
- La mise en place de protocoles de communication clairs et précis pour éviter les malentendus.

Au cours de cette période, l'homme est perçu comme un maillon faible dans le système industriel du fait de ses maladresses, son inconstance, son manque de concentration, etc... L'analyse du comportement humain est alors réalisée a posteriori, à la suite d'un accident ou incident, pour trouver le fautif ayant commis une « erreur humaine ». Pour éviter que l'erreur ne se reproduise, le panel d'action s'orientait essentiellement vers la sanction, remplacement par un opérateur estimé plus compétent, contraintes supplémentaires.

3.2 L'entre-deux guerres

Cette période est marquée dans un premier temps par une forte croissance de la production (les années folles) puis après le Krach boursier de 1930, par une période de crise nécessitant un gain de rendement dans la productivité (la grande dépression). Elle est marquée par l'essor des méthodes de rationalisation du travail, notamment le taylorisme et le fordisme. Ces méthodes visaient à augmenter la productivité en standardisant les tâches et en optimisant les processus de production. Cependant, elles ont souvent conduit à une déshumanisation du travail, avec des ouvriers soumis à des rythmes de travail intenses et répétitifs. C'est aussi au cours de cette période que Georges Friedmann, un sociologue français, a été l'un des principaux critiques de la rationalisation du travail. Il a souligné les effets négatifs du travail à la chaîne sur les ouvriers, notamment la perte de compétences et l'aliénation. Friedmann a plaidé pour une approche plus humaniste du travail, intégrant des aspects psychologiques et sociaux. Afin de limiter les risques « d'erreurs humaines » durant cette période, les principaux principes et outils étaient la standardisation permettant de réduire les variations dans les postes de travail. La formation et la spécialisation permettant d'augmenter les compétences. Les contrôles qualité en fin de chaîne, la mise en place de détrompeurs se sont développées. L'automatisation partielle (la technologie de l'époque était limitée) certaines machines ont été conçues pour effectuer des tâches répétitives avec une précision accrue, réduisant ainsi la dépendance aux compétences humaines et les risques d'erreurs. Les

¹ Pour des considérations spécifiques aux accidents de barrages et à l'histoire de la prise en compte des facteurs SOH dans les barrages voir [2, 3].

conditions de travail ont également été améliorées (mise en place de pauses, ...) pour permettre d'accroître la fiabilité et la rentabilité des ressources humaines.

A ce stade, l'homme, en tant qu'individu, étant encore perçu comme une ressource dont l'efficacité et la fiabilité nécessitent d'être maîtrisées, cadrées, contrôlées.

3.3 L'après-guerre, automatisation, ergonomie, formation

Cette période, connue sous le nom des « Trente Glorieuses » est marquée par une forte croissance, un faible taux de chômage et également par l'industrialisation de secteurs « à risque » comme la chimie, l'aviation et le nucléaire. Côté facteur humain, cette période s'est essentiellement traduite par la mécanisation et l'automatisation pour remplacer l'homme par des machines considérées comme plus fiables. Les caractéristiques de ces approches contribuent à expliquer deux grands accidents dans le secteur de la chimie. La catastrophe de Flixborough, survenue en Angleterre en 1974 et celle de Seveso, en Italie en 1976. A Flixborough, une explosion dans cette usine chimique tue 28 personnes et fait 36 blessés. L'accident a été causé par une fuite massive de cyclohexane, un produit chimique hautement inflammable. L'enquête a révélé qu'avant l'accident, une fuite avait été détectée sur un réacteur. Pour maintenir la production, une tuyauterie temporaire a été installée sans une analyse de sécurité adéquate, des erreurs humaines dans la conception et la maintenance des équipements. A l'issue de l'analyse parmi les principales mesures on trouve la supervision par des ingénieurs qualifiés de toute modification pour garantir la sécurité et la mise en place de protocoles clairs pour gérer les situations d'urgence. A Seveso, une réaction chimique incontrôlée a conduit à une fuite de dioxine dans l'usine et un nuage chimique dans l'environnement. Celui-ci a contaminé une vaste zone, entraînant des évacuations massives et des problèmes de santé à long terme pour les résidents. Cet incident a conduit à la création de la directive Seveso, qui impose des normes strictes de sécurité pour les industries à haut risque.

3.4 De 1980 aux années 2000, émergence d'une approche systémique

Cette période est marquée par un grand nombre d'accidents et de catastrophes industrielles (on parlera pour la décennie 1980 à 1990 de la « safety culture decade » avec l'accident de Three Mile Island, Bhopal, Tchernobyl, Challenger, King Cross, Piper Alpha, ...) qui mettent en évidence que l'homme agit dans un système global. Notamment à partir des années 1990, le facteur organisationnel (notion d'accident organisationnel) au sens large se développe englobant la sociologie, l'anthropologie, l'analyse systémique ; les premiers programmes de gestion des ressources de l'équipage (ou Crew Resource Management, CRM) sont adoptés dans l'aviation pour améliorer la communication et la prise de décision, réduisant ainsi les erreurs humaines.

A partir de cette époque, les erreurs humaines sont de plus en plus vues comme des défaillances systémiques. Cela signifie que, plutôt que de blâmer uniquement les individus pour leurs erreurs, on reconnaît que ces erreurs sont souvent le résultat de problèmes plus profonds dans le système global. En effet, les systèmes modernes, qu'ils soient industriels, technologiques ou organisationnels, sont devenus extrêmement complexes. Cette complexité augmente les chances que des erreurs se produisent, non pas à cause de l'incompétence des individus, mais à cause de la manière dont les systèmes sont conçus et gérés. Ainsi, les erreurs humaines peuvent souvent être le résultat d'interactions défaillantes entre différents éléments du système, tels que les procédures, les technologies, et les environnements de travail. Par exemple, une mauvaise conception de l'interface utilisateur peut conduire à des erreurs de manipulation. C'est en grande partie ce qui motive l'apparition du concept de « facteurs organisationnels » et le recours à la notion de culture. Les cultures organisationnelles et les pratiques de gestion sont progressivement considérées comme des explications possibles, voire des causes profondes, aux erreurs humaines.

Afin de souligner un changement de paradigme, un certain nombre de chercheurs dans les sciences des risques opposent « Safety I » à « Safety II » [4]. Selon eux, l'approche traditionnelle de la sécurité (ou Safety I) se concentre sur la prévention des erreurs et des accidents. Elle vise à minimiser les risques en identifiant et en éliminant les causes des défaillances pour supprimer tous les événements indésirables. En d'autres termes, la Safety-I cherche à comprendre ce qui ne va pas et à empêcher que cela ne se reproduise. Cette approche réagit aux événements indésirables après qu'ils se sont produits. Les enquêtes sur les accidents visent à identifier les causes et les facteurs contributifs pour éviter leur récurrence. Les erreurs humaines sont souvent vues comme des défaillances ou des faiblesses à éliminer. Les humains sont perçus comme des sources de variabilité et de

risques. Par opposition, une approche plus moderne (Safety II) et proactive de la sécurité, se concentre sur la résilience et la capacité des systèmes à fonctionner correctement dans des conditions variées. La sécurité est définie comme la capacité à réussir dans des conditions variées. L'objectif est de maximiser le nombre de choses qui vont bien. Cette approche se concentre sur la compréhension de la manière dont les systèmes fonctionnent correctement et sur l'amélioration de ces processus. Elle cherche à apprendre des succès autant que des échecs.

En synthèse on peut retenir que l'histoire de la prise en compte des contributions humaines à la sécurité industrielles a été jalonnée par des évolutions techniques, organisationnelles et par des accidents ou catastrophes. Rétrospectivement, il est possible de considérer que cette évolution s'est faite par paliers successifs (Figure 1).

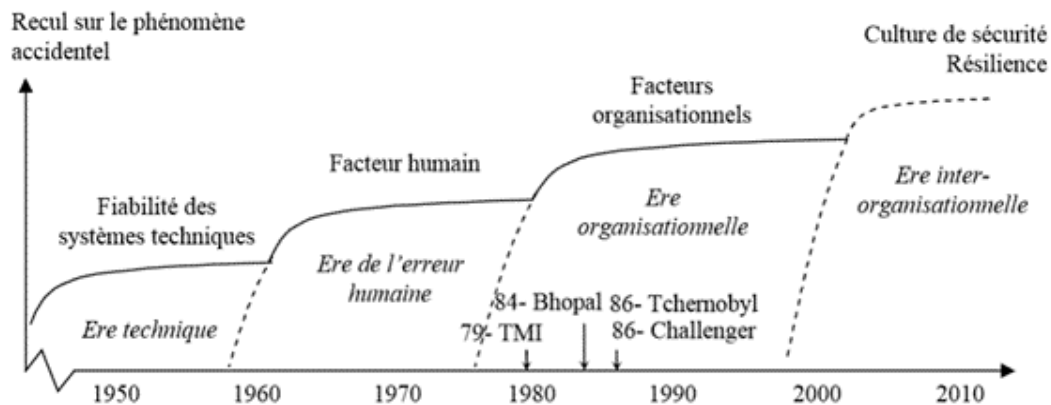


Figure 1 : Principales ères dans la gestion de la sécurité industrielle (adapté de Groeneweg [5])

3.5 Zoom sur 1990 : le concept de James Reason, base des méthodologies modernes

C'est dans les années 1990 qu'une avancée conséquente a été réalisée par le psychologue britannique James Reason, pour établir un cadre puissant pour analyser et prévenir les erreurs humaines et les accidents dans les systèmes complexes, en mettant en évidence l'importance des défenses multiples et de la gestion des conditions latentes [6]. Il a illustré sa théorie à l'aide du célèbre modèle du « fromage suisse » (Figure 2). Bien qu'il ait été largement discuté et critiqué par les communautés académiques et opérationnelles [7, 8] ce modèle qui reste le moteur conceptuel de très nombreuses méthodes SOH modernes actuelles et qui encourage les organisations à identifier et à corriger les conditions latentes pour renforcer les défenses et réduire les probabilités d'accident.

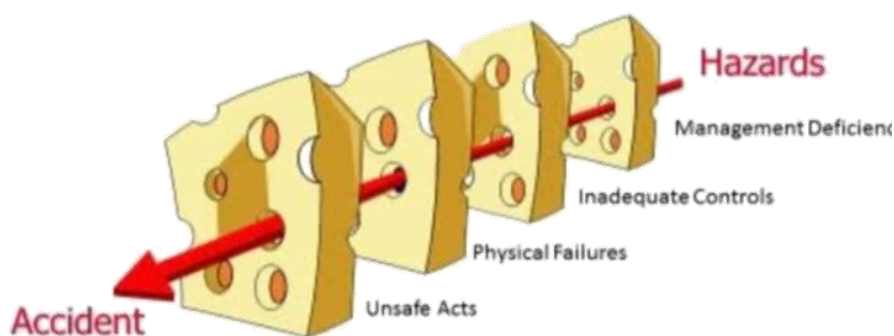


Figure 2 : le modèle du fromage Suisse (ou SCM) adapté de Reason [9].

Ce modèle représente un système de défense comme une série de tranches de fromage Suisse (d'où son nom), où chaque tranche représente une barrière ou une défense contre les erreurs potentielles. Les trous dans les tranches symbolisent les faiblesses ou les lacunes dans chaque barrière. Ces trous peuvent être causés par des erreurs humaines, des défaillances techniques, ou des conditions organisationnelles. Un accident survient lorsque les trous de plusieurs tranches s'alignent, permettant à une trajectoire d'erreur de traverser toutes les barrières et de provoquer un incident. Les tranches de fromage représentent à la fois des défenses actives

(comme les actions des opérateurs) et passives (comme les procédures et les équipements de sécurité). James Reason distingue également les erreurs actives (commises par les opérateurs en première ligne) des conditions latentes (problèmes organisationnels ou de conception qui prédisposent le système aux erreurs). Ce modèle souligne l'importance d'avoir plusieurs couches de défense pour prévenir les accidents, car une seule barrière est rarement suffisante. Le modèle encourage les organisations à identifier et à corriger les conditions latentes pour renforcer les défenses et réduire la probabilité d'accident.

4. LE FACTEUR HUMAIN DANS LES EDD : METHODE ECHO

Nous avons présenté le cadre réglementaire des EDD de barrages et un rapide historique de la prise en compte du facteur humain dans la sécurité industrielle. Ces éléments permettent désormais de présenter la genèse de la méthode ECHO, développée par le CIH pour l'évaluation et la cotation des EI impliquant l'humain dans les EDD de barrages (4.1). Dans cette section, nous en présentons le moteur conceptuel et le principe d'adaptation de la méthode CREAM au contexte des EDD de barrages (4.2) et le principe de son utilisation (4.3) appuyé sur un exemple concret (4.4).

4.1 Origine de la méthode ECHO

Pour permettre une cotation SOH dans les EDD qui se base sur des références solides, le choix de la méthode de base s'est porté sur une méthodologie récente qui intègre l'ensemble des aspects SOH et permet d'aboutir à une cotation la plus fiable et reproductible. À la suite d'analyses comparatives de plusieurs méthodes récentes, le choix du CIH s'est porté sur la méthode CREAM (Cognitive Reliability and Error Analysis Method ; [10]) pour servir de base à la méthode ECHO (Evaluation et Cotation des Humaines et Organisationnelles).

4.2 Adaptation des principes de la méthode CREAM

La note DRA10 de l'INERIS [11] a passé en revue plus de 50 méthodes d'évaluation du facteur humains pour en retenir une douzaine parmi les plus accessibles, dont CREAM. Ces méthodes, plus ou moins complexes de mise en œuvre, permettent pour certaines d'attribuer une cotation du facteur humain sur une plage allant jusqu'à 10^{-4} voire 10^{-5} , soit, dans l'échelle semi-quantitative de A à D ou E.

La méthode CREAM développée par Erik Hollnagel [10], est une approche systématique pour analyser et évaluer la fiabilité cognitive des opérateurs dans les systèmes complexes. Elle vise à identifier et évaluer les erreurs cognitives potentielles des opérateurs, en se concentrant sur les facteurs qui influencent la performance humaine. La méthode identifie neuf CPC (Critères de Performance Commune) qui influencent la performance humaine, telles que la complexité de la tâche, les conditions de travail, et la qualité des interfaces homme-machine. La méthode repose sur un modèle qui intègre quatre niveaux de contrôle : stratégique, tactique, opportuniste et aléatoire. CREAM utilise ensuite des matrices de performance pour évaluer la probabilité d'erreurs en fonction des CPC. La méthode est applicable dans divers secteurs, notamment l'industrie nucléaire, l'aviation, et les systèmes de contrôle de processus. Cette méthode offre une approche structurée pour comprendre les erreurs humaines et propose des mesures pour améliorer la fiabilité cognitive. Cette méthode se décompose en plusieurs étapes, incluant la définition du contexte, l'identification des tâches critiques, l'évaluation des CPC, et l'analyse des erreurs potentielles.

La méthode ECHO du CIH est une adaptation à la méthodologie EDD de la méthode CREAM. Elle permet ainsi au groupe de travail en charge de réaliser l'EDD de pouvoir estimer les occurrences des événements initiateurs liés aux actions humaines. Pour utiliser correctement la méthode ECHO il est indispensable de sortir de la posture selon laquelle la variabilité humaine est source d'erreur (Safety I). Ceci réduit l'analyse des accidents à une recherche d'erreur humaine potentielle. Finalement, si la démarche est conduite ainsi, les conclusions vont tendre à réduire la variabilité humaine par plus de procédures, d'automatisation, et considérer que là où il y a de l'humain, il faut des barrières et des défenses. Par opposition, la posture induite par la méthode ECHO, admet que si l'homme est évidemment variable dans son comportement et sa performance, cette variabilité est non-seulement source d'erreur mais également de rattrapage, d'anticipation, d'adaptabilité ou d'innovation. L'erreur humaine est alors une conséquence davantage qu'une cause (Safety II). Dans cette optique, la variabilité humaine est plutôt une richesse. Le but ultime est de concevoir des systèmes qui intègre et/ou tolère cette variabilité, car comme l'affirme James Reason « *You cannot change people, but you can change the conditions*

under which people work » [12]. L'humain peut, dès lors être l'initiateur d'un ERC ou une barrière et sa prise en compte dans une EDD demande une posture qualitative et compréhensive.

4.3 Utilisation et déroulé de la méthode ECHO

La démarche ECHO commence donc à la base, par une formation des personnes pour comprendre la posture à adopter lors du déroulement de la méthode. Pour assurer une bonne efficacité de la méthode ECHO, elle doit être obligatoirement déroulée de manière participative avec l'ensemble du groupe de travail EDD à toutes les étapes. La visite sur le terrain, des installations, en présence de tous les acteurs et de manière indispensable de l'exploitant est un élément clé de la méthode. Sur le terrain le questionnement s'intéresse à :

- L'attendu vis-à-vis du procédé (c'est-à-dire à peu près l'inverse de la recherche d'un « initiateur d'erreur humaine »).
- Le contexte de réalisation de chaque activité considérée.
- Tout ce qui pourrait faciliter la bonne réalisation ou au contraire qui pourrait gêner, voir empêcher la bonne réalisation.

Sur la base du recueil de ces informations et données documentaires, la méthode ECHO se poursuit en salle sous forme de groupe de travail dans lequel l'exploitant a, une fois encore, un rôle prépondérant. L'objectif est d'analyser 9 dimensions de l'activité concernée :

- Le temps disponible (pour réaliser l'activité)
- Les objectifs simultanés
- L'environnement de travail
- Les alarmes (ou « activateurs »)
- Les postes de commande (ou « IHM »)
- Les compétences et la formation
- L'organisation du travail
- Les procédures
- Le travail en équipe

Ces 9 dimensions sont en interactions les unes avec les autres (Figure 3), mais afin de permettre l'analyse par des non-spécialistes, la méthode prévoit d'analyser chaque dimension de manière indépendante. L'analyse est réalisée par le groupe de travail, de manière participative et verbalisée, pour permettre une évaluation qualitative (exprimable par des mots, par exemple « défavorable car l'interface homme-machine peut induire des confusions »).

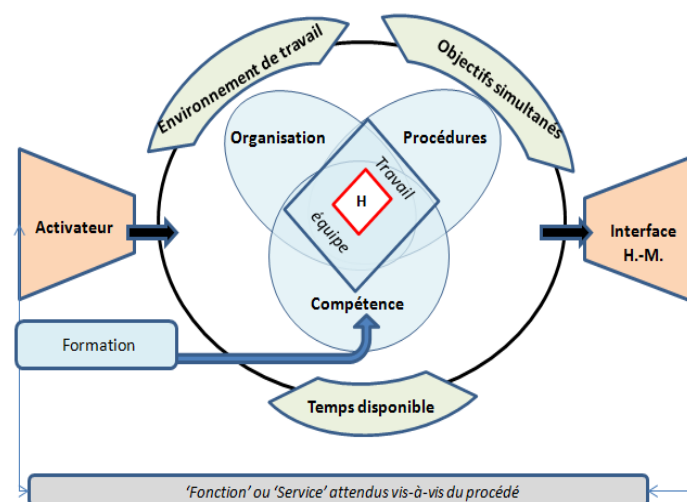


Figure 3 : Modèle FOH-EDD montrant les interactions entre dimensions étudiées. Deux lectures sont possibles (1) en partant de l'homme (H), du centre vers l'extérieur ou (2) de gauche à droite avec une vision fonctionnelle où l'« activation », par exemple via une alarme, précède l'action humaine.

La méthode consiste ensuite à faire la « balance » entre les dimensions favorable au bon déroulé de l'activité étudiée et celles défavorables. Les interrelations entre les dimensions sont considérées, *a posteriori*, et de façon automatisée par l'application de coefficients de pondération². *In fine*, malgré une analyse successive de chaque dimension indépendamment des autres, la méthode ECHO est capable de rendre compte de situations d'interactions (ici théoriques) telles que « l'opérateur à plusieurs tâches simultanées à réaliser, qui peuvent le détourner de son objectif, cela influence le temps disponible pour chaque tâche étant donnée l'organisation spécifique à son unité » ou encore « l'ergonomie de l'espace de travail et du système d'alarme sont excellente, l'opérateur est formé, mais pour l'activité considérée le temps disponible serait insuffisant ».

Le pesage des influences positives et négatives, qui tient compte des pondérations liées aux interactions, se fait sous forme d'un calcul matriciel (dont le principe est présenté Figure 4) inerrant à la conception de la méthode et inspiré des travaux d'Hollnagel. Cette étape a été automatisée afin d'optimiser le temps consacré par le groupe de travail à la cotation des EI-SOH et lui permettre de se consacrer à la discussion, l'étude et la caractérisation qualitative des 9 dimensions.

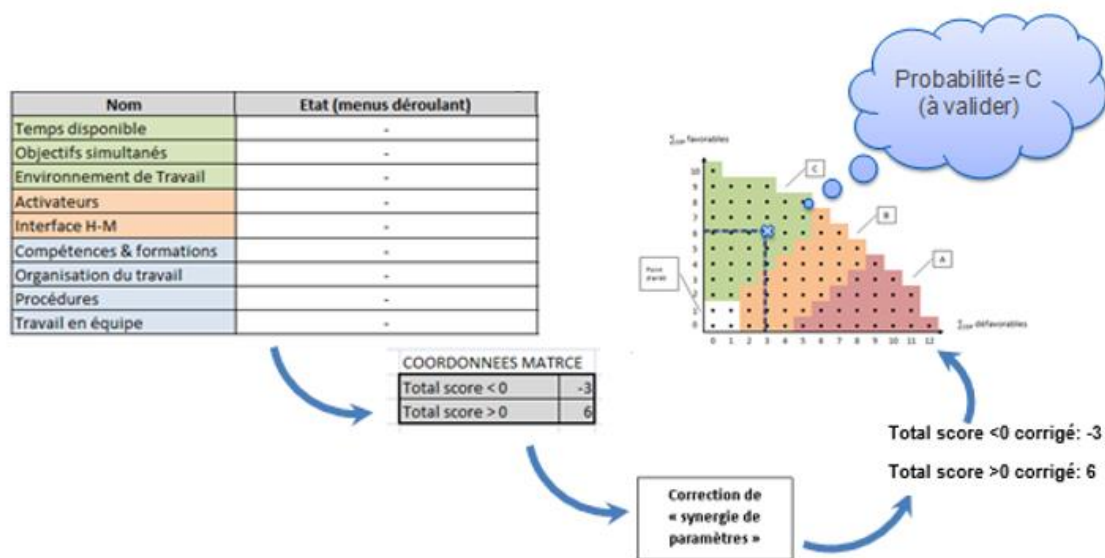
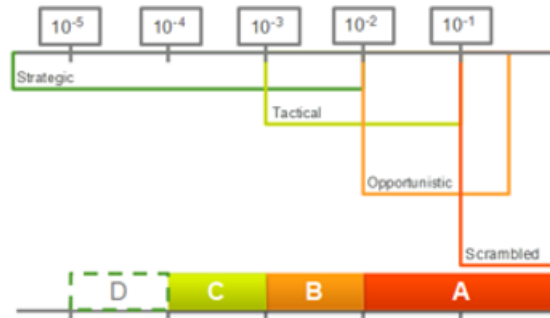


Figure 4 : Principe de cotation des EI-SOH selon la méthode ECHO, passage d'une évaluation qualitative de 9 dimensions indépendantes à une cotation semi-quantitative (classe d'occurrence) intégrant les interrelations possibles entre ces dimensions.

Le résultat du pesage propose une cotation comprise entre A, B ou C qui peut être ajustée si le groupe de travail estime cela nécessaire et produit une justification. La possibilité de modifier la cotation proposée par la méthode souligne l'importance accordée aux avis de l'exploitant et à l'expertise des membres du groupe de travail. Cette possibilité de modification justifiée ouvre également la possibilité de cotation d'EI-SOH en classe D. En effet, depuis 2022 la méthode de cotation ECHO a été ajustée pour établir des critères dérogatoires, qui permettent cette cotation en D.

Pour se faire, une étude a été réalisée sur la base de l'état de l'Art académique dans les méthodes de fiabilité humaine, en particulier ceux concernant le modèle de contrôle cognitif COCOM [13]. Le modèle COCOM détermine des plages d'occurrence d'erreur humaine en fonction du mode de contrôle cognitifs qu'un individu est capable de mobiliser pour une activité donnée (Figure 5). Les quatre modes de contrôle cognitifs sont : brouillé (le plus défavorable : l'individu est principalement en réaction), opportuniste, tactique ou stratégique (le plus favorable : grande capacité de planification, de vérification et de contrôle).

² La pondération est réalisée par l'utilisation de règles logiques et mathématiques, définies sur la base d'un état de l'art académique et par dire d'experts lors de la conception de la méthode. Ce fonctionnement a été volontairement pensé pour fonctionner comme une boîte noire du point de vue de l'utilisateur pour, sinon éviter, limiter d'éventuelles « rétro-cotations » (l'utilisateur modifiant les données d'entrée en fonction de la cotation qu'il « aimerait » obtenir en sortie) [2].



Mode de contrôle cognitif	Probabilité d'échec
Stratégique	$0.5 \text{ E-}5 > p > 1.0 \text{ E-}2$
Tactique	$1.0 \text{ E-}3 > p > 1.0 \text{ E-}1$
Opportuniste	$1.0 \text{ E-}2 > p > 0.5 \text{ E-}0$
Brouillé	$1.0 \text{ E-}1 > p > 1.0 \text{ E-}0$

Figure 5 : Modes de contrôle cognitif et leurs plages de probabilité d'erreur humaine (adapté de Hollnagel, [10, 13])

Ainsi, selon des critères établis par la méthode ECHO, si la cotation qui ressort du pesage est cotée en C et que les critères permettant de statuer que le mode de contrôle cognitif est stratégique, alors la cotation D est possible. La méthode ECHO met également en évidence des « points d'arrêts » si nécessaire, lorsqu'il y a des incohérences flagrantes entre l'évaluation de différentes dimensions, ou si l'évaluation qualitative apportée par le groupe de travail est trop neutre. En cas de point d'arrêt, le groupe de travail est invité à reconsidérer son analyse ; pour ce faire il peut se reporter au guide utilisateur de la méthode ECHO qui prévoit, à la façon d'un guide de résolution de problèmes, certains cas fréquents issus d'un premier retour d'expérience, ou bien à se référer au projet EDD qui mobilise alors une expertise *ad hoc*.

4.4 Exemple d'application de la méthode ECHO

Environ un an avant la sortie d'une EDD, le groupe pluridisciplinaire en charge de la rédaction de l'étude de danger se réunit pour un séminaire qui se tient à proximité de l'aménagement. Lest travaux préparatoire au séminaire se sont déjà déroulés et le groupe est constitué d'un pilote de rédaction, d'un vérificateur général et de spécialistes de différents domaines (génie civil, géologue, auscultation, mécanique, hydraulicien, structure, contrôle commande, ...). Lors de la visite de terrain, parmi les ERC et EIC qui seront observés, on retrouve généralement les ouvertures intempestives de vannes de l'évacuateur de crue en début de crue ou en essai, les ouvertures intempestives de vannes de fond en essai, les non-ouvertures de vannes pouvant conduire à un exhaussement du plan d'eau. Tous ces événements comportent une éventuelle composante liée à une action humaine (Figure 6).

Lors de la visite sur le terrain, au passage devant chacun de ces organes, l'exploitant présent expose dans le détail la manière dont les actions se déroulent ; déplacements, organes de commande, procédures, conditions de travail, composition des équipes, interactions avec l'extérieur, etc. lors de cette reconstitution, les conditions d'interventions sont appréciées par l'ensemble des participants ; propreté, étiquetage, quiétude des postes, ergonomie, etc. de manière à pouvoir se projeter en situation. Tous les aspects de l'action sont observés.

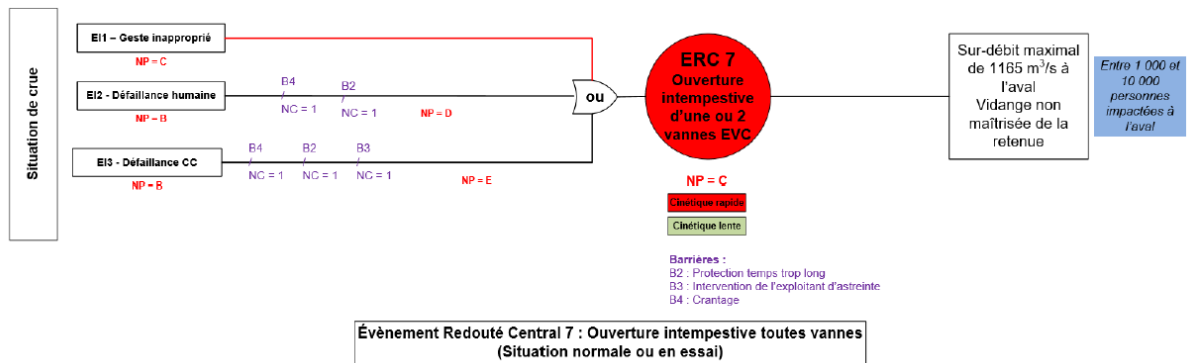


Figure 6 : Exemple d'arbre des défaillances et des événements d'un ERC comportant une composante « facteur humain »

Une fois de retour en salle, risque par risque, critère par critère, les conditions d'intervention sont appréciées selon la grille d'analyse pour estimer les aspects favorables ou défavorables de l'intervention. Les justifications sont tracées et seront reportées dans l'EDD. Le fichier EXCEL de la méthode ECHO est renseigné et permet automatiquement de proposer une cotation qui sera validée ou non par le groupe de travail (Tableau 2). Si les conditions sont toutes favorables, le groupe de travail pousse les réflexions plus loin pour analyser si la cotation proposée par le fichier ECHO ne peut pas être encore améliorée d'une décade en fonction de critères supplémentaires liés au niveau cognitif stratégique des décisions à prendre.

Tableau 2 : Exemple de justification de la cotation d'un EI « geste inapproprié »

Réf.	Intitulé	Occurrence	Argumentaire de cotation
1	Geste inapproprié (en crue)	C	Lorsqu'on rentre en état de crue, deux agents à minima sont mobilisés : l'un réalise la manœuvre des vannes (un seul bouton permet la manœuvre des deux vannes), et le deuxième reste en salle de commande (chargé de conduite en crue). C'est événement traite un cas « effet tunnel » : l'exploitant donneur d'ordres (en salle de commande) est convaincu qu'il faut ouvrir les vannes plus que nécessaire. Et l'exploitant en galerie de crête exécute les actions sans contester. <u>Environnement de travail</u> : L'agent qui réalise les manœuvres est en galerie de crête. La galerie est étroite, humide, elle n'est pas dotée d'un mobilier spécifique pour que l'agent soit installé correctement, les abaquages sont lus sur place. Par ailleurs il doit sortir pour vérifier la cote sur l'échelle limnimétrique dont lecture est faite depuis la RD toutes les demi-heures (après avoir réalisé la manœuvre des vannes) et il est par conséquent exposé aux intempéries. En outre, lors que le GE est mis en service l'exploitant est exposé également aux gaz et à un niveau de bruit important. En conclusion, l'environnement peut gêner la bonne exécution de la manœuvre. <u>Temps disponible</u> : Le temps prévu pour la lecture des abaquages est de l'échelle limnimétrique en adéquation avec la cinétique de l'événement. La retenue de Bort est très capacitive ce qui fait qu'une montée abrupte de niveau très improbable. <u>Objectifs simultanés</u> : Non existants. <u>Activateurs</u> : Les calculs sont faits avec l'aide des abaquages. La cote est très stable. Si celui qui fait le calcul se trompe et celui qui fait la manœuvre n'a pas beaucoup d'expérience, une erreur peut survenir. L'afficheur avec les deux cotes de la retenue sont bien visibles (dans la salle de commande). En galerie de crête il n'y a pas d'affichage de relevé de cote, mais il y a un afficheur de l'ouverture et les efforts des vannes au-dessus de l'armoire de commande. Le débit à l'aval réel n'est pas mesuré (c'est calculé avec les abaquages). <u>Interface homme machine</u> : Interfaces simples, tout est bien étiqueté. Un téléphone filaire se trouve sur la galerie de crête à proximité des armoires en cas d'impossibilité de communication via le téléphone portable. <u>Compétences et formations</u> : Des formations sont faites à minima tous les 2 ans et en simulateur SIMBA tous les deux ans. Tous les agents sont formés pour passer les crues. Les nouveaux arrivants sont formés. Les agents de quart sont en priorité des agents formés avec de l'expérience. Les nouveaux agents sont accompagnés. Un nouvel agent peut se trouver à manœuvrer pour une première fois tout seul, mais il ne sera jamais amené à piloter la crue (faire les calculs avec les abaquages). <u>Organisation du travail</u> : L'organisation est adaptée (standard EDF HYDRO). <u>Procédures</u> : Toutes les procédures pour le passage de crues sont écrites, y comprises celles en mode secours. <u>Travail en équipe</u> : Les agents travaillent en mode complémentaire. La consigne intègre l'appel à la galerie de crête pour vérifier le bon déroulement de la procédure toutes les demi-heures.

5. DISCUSSION ET REFLEXIONS EN COURS

La conception et le déploiement de la méthode ECHO a permis des avancées significatives dans la prise en compte des SOH dans les EDD. En particulier le passage d'une approche négative, culpabilisante, centrée sur l'erreur humaine, à une approche compréhensive, ouverte au contexte de réalisation des activités et à la complexité de la performance humaine dans les systèmes sociotechniques. La méthode ECHO permet également d'approfondir le niveau d'analyse des EI-SOH et vise à guider les groupes de travail tout en leur laissant la liberté suffisante pour rendre compte de réalités opérationnelles très diverses. Là réside probablement le défi principal : tendre vers une inter-comparabilité des résultats fournis par la méthode sans masquer la diversité du réel. L'inter-comparabilité est un enjeu pour que les EDD apportent une vision synoptique globale de la sûreté hydraulique du parc de barrages exploités par EDF, autant qu'un enjeu de transparence ; mais la diversité émerge de la spécificité de chaque individu (que l'on considère un technicien d'exploitation ou l'ingénieur utilisateur de la méthode ECHO), de la spécificité de chaque ouvrage et des réalités sociologiques qui conduisent toute organisation à adapter le schéma formel de l'organigramme. Ce défi, s'il n'admet probablement pas de solution, de réponse, qui soit définitive, ne doit pas décourager d'améliorer la méthode. A cet effet, la prise en compte des retours utilisateurs, l'intégration des résultats académiques les plus récents et la posture réflexive et auto-critique des concepteurs apparaissent nécessaires. Quatre chantiers sont actuellement identifiés pour continuer d'affiner la prise en compte des SOH dans les EDD, le CIH d'EDF a identifié.

Premièrement, la question de la « reprise de conscience ». Savoir distinguer d'un point de vue SOH, les ouvertures totales intempestives qui dans bien des cas, sont beaucoup moins probables (voire non-crédibles) que les ouvertures partielles intempestives. Ainsi sur certains aménagements, l'ouverture totale d'une vanne de manière intempestive paraît complètement impossible tellement les manœuvres seraient longues et techniquement exigeantes (manœuvres d'accrochages, passage de nombreux crans, basculement de commande, ...). Sur ces aménagements, s'il y avait une action inappropriée, elle pourrait avoir pour conséquence l'ouverture supplémentaires d'un ou de deux pas de crantage sur une des vannes mais pas à une ouverture totale. Mais, pour intégrer cette réalité dans une EDD, quel taux d'ouverture correspondrait à une prise de conscience certaine de l'erreur faudrait-il retenir ? Pour l'instant cette question reste ouverte et, du point de vue méthodologique, il est admis dans certains cas évidents des ajustements justifiés permettant d'en tenir compte. Une exploration dans domaine, considérant les travaux sur le concept de conscience de la situation [14, 15], devra permettre de fixer des repères raisonnablement acceptables et partagés.

En étendant la réflexion précédente, il serait intéressant de mieux discerner ce qui peut être raisonnablement considéré « impossible » d'un point de vue SOH et qui pourrait donc être écarté des analyses, de ce qui, même très improbable, doit apparaître au stade de l'ADR dans les EDD. Ainsi, par exemple, un scénario « ouverture totale de toutes les vannes » paraît raisonnablement impossible sur certains aménagements (complexité et le temps de manœuvre extrêmement long, parfois au-delà d'une journée). Sur ces aménagements ce scénario mériterait d'être écarté à l'APR. Mais, à ce jour, on représente ce scénario dans l'EDD car il entraînerait des conséquences enveloppe et une posture radicalement conservatrice conduit à considérer qu'il n'y a pas de raison qu'une décision inappropriée ne s'applique qu'à une seule vanne. Les dérogations dans ce type de cas sont encore rares par manque de critères explicites et formels permettant d'arbitrer entre « très improbable » et « impossible ».

Un autre chantier méthodologique concerne la distinction entre les éléments qui doivent être pris en compte dans la cotation des EI-SOH et ceux qui relève des composantes SOH considérées comme barrières. Ce questionnement est partagé par de nombreux industriels et chercheurs s'intéressant aux EDD ou aux études de fiabilité, il a fait l'objet d'une note de recommandations de l'INERIS dite « Oméga 20 » [16] mais reste aujourd'hui ouvert dans la communauté académique (comme en témoigne la revue de littérature récente de [17]). En ce qui concerne les EDD de barrages d'EDF, la question se pose par exemple dans l'analyse des prises de décision et de leur mise en œuvre. Le fait que ces processus impliquent un individu seul ou plusieurs individus dans le cadre d'une organisation spécifique, est un critère d'une grande importance [18, 19, 20] ; or, à ce jour, un poste de supervision déporté, instrumenté et actif dans le processus décisionnel d'ouverture des vannes peut soit être considéré comme une barrière de sécurité, soit comme faisant parti de la cotation de base d'un EI-SOH. Ce raisonnement peut être similaire lorsque l'on analyse des situations incluant un crantage des vannes ou un

dispositif « temps trop long ». La multitude des cas dans ces domaines pourrait être complétée et faire l'objet de recommandations de traitement.

Enfin, la méthode ECHO a été développée sur la base d'un cahier des charges « conservatif » [2 ; p. 164, note 214], ce qui à l'usage la conduit à paraître parfois sévère pour des cas d'opérations « simples » sur certains aménagements hydrauliques. Par ailleurs, afin de répondre au besoin de cotation, les méthodes de fiabilité humaine, comme CREAM, reposent sur des données issues d'études FOH dans des systèmes sociotechniques complexes. On peut légitimement se demander si l'étalonnage doit-il être le même entre essais complexes en centrale nucléaire ou en aéronautique et un essai d'ouverture de vanne partiel sur un barrage ? En effet, ouvrir une vanne de manière « binaire » lors d'un essai avec des critères d'ouverture fixes et contrôlés n'est pas du même niveau de complexité et donc de probabilité de réaliser un geste inapproprié qu'un pilote d'avion ou de centrale nucléaire [2 ; p. 160 – 163]. Cette question est en instruction et de manière intuitive il est possible de percevoir un champ d'investigation qui permettrait d'ajuster de manière encore plus réaliste les cotations.

6. CONCLUSION

La mise en place des EDD de barrage a conduit les exploitants à adopter une approche vertueuse, intégrée et transverse, regroupant dans un document unique les risques techniques, humains et organisationnels. L'histoire de l'émergence des concepts, aujourd'hui couramment utilisés dans l'industrie, tels que « facteur humain », « facteur organisationnel », « culture sécurité » ou « accident systémique », montre qu'une longue maturation culturelle a été nécessaire. EDF-CIH, de la façon la plus réactive possible, a également connu des évolutions dans sa façon de considérer la manière d'évaluer et de coter la « composante humaine » de la sécurité de ses ouvrages.

Face à l'absence de méthode spécifiquement dédiée à l'étude des facteurs socio-organisationnels et humains dans l'exploitation de barrages, le CIH a développé sa propre méthode, baptisée ECHO, dans le cadre d'une thèse en partenariat avec le Centre de recherche sur les Risques & les Crises (MINES Paris – PSL). La méthode ECHO est utilisée depuis 2015 et donne pleinement satisfaction à l'organisme agréé qui l'a développée. Elle a permis de contribuer à la fiabilisation et la mise en cohérence des cotations des EI-SOH aux ERC dans les EDD, produisant le cas échéant des recommandations organisationnelles.

Depuis ses premières applications, grâce aux nombreux retours des utilisateurs, la méthode ECHO a fait l'objet de compléments et bénéficie d'un processus d'amélioration continue pour renforcer l'intégration des spécificités de l'exploitation des barrages et pour prendre en compte l'évolution de celle-ci. En vertu de ce processus d'amélioration continue et de maintien de condition opérationnelle, des perspectives sont actuellement à l'étude pour continuer de développer cette méthode.

RÉFÉRENCES

- [1] de Ruijter, A., & Guldenmund, F. (2016). The bowtie method: A review. *Safety science*, 88, 211-218.
- [2] Larouée, J. (2015). Théorie et pratique des modèles d'erreur humaine dans la sécurité des barrages hydroélectriques : le cas des études de dangers de barrages d'EDF (Doctoral dissertation, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris).
- [3] Duffaut, P., & Larouée, J. (2019). Geology, Engineering and Humanities: three sciences behind the Malpasset dam failure (France, 2 December 1959). *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 52(4), 445-458.
- [4] Hollnagel, E. (2018). *Safety-I and safety-II: the past and future of safety management*. CRC press.
- [5] Groeneweg, J. (2002). *Controlling the controllable. Preventing business upsets*, fifth edition. Global Safety Group Publication. pp. 1-528.
- [6] Larouée, J., & Guarnieri, F. (2015, September). From theory to practice: itinerary of Reasons' Swiss Cheese Model. In *ESREL 2015* (pp. 817-824). CRC Press.

-
- [7] Reason J., Hollnagel E., Paries J. (2006). Revisiting the “Swiss Cheese” Model of Accidents. EEC Note No. 13/06. European Organisation for the Safety of Air Navigation. October 2006.
 - [8] Larouzee, J., & Le Coze, J. C. (2020). Good and bad reasons: The Swiss cheese model and its critics. *Safety science*, 126, 104660.
 - [9] Reason, J. (2000). Human error: models and management. *Bmj*, 320(7237), 768-770.
 - [10] Hollnagel, E. (1998). Cognitive reliability and error analysis method (CREAM). Elsevier.
 - [11] Perinet, R., Vu, T. N., & Prats, F. (2011). State of the art of methods of probabilistic assessment of human reliability. Study report; Etat de l'art des methodes d'evaluation probabiliste de la fiabilite humaine. Rapport d'etude n° DRA-10-111793-01257A.
 - [12] Reason J. (1990b). *Human Error*. Cambridge: Cambridge University Press.
 - [13] Hollnagel, E. (2002). Cognition as control: A pragmatic approach to the modelling of joint cognitive systems. *IEEE Journal of Systems, Man and Cybernetics*.
 - [14] Endsley, M. R. (1990). *Situation awareness in dynamic human decision making: Theory and measurement* (Doctoral dissertation, University of Southern California).
 - [15] Bakdash, J. Z., Marusich, L. R., Cox, K. R., Geuss, M. N., Zaroukian, E. G., & Morris, K. M. (2022). The validity of situation awareness for performance: a meta-analysis. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 23(2), 221-244.
 - [16] Miche, E. & Perinet, R. (2009). Démarche d'évaluation des Barrières Humaines de Sécurité - Ω 20. Rapport d'étude INERIS, n° DRA-09-103041-06026B. 66 p.
 - [17] Liu, Y. (2020). Safety barriers: Research advances and new thoughts on theory, engineering and management. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 67, 104260.
 - [18] Orasanu, J., & Salas, E. (1993). Team decision making in complex environments. *Human Factors*, 35(2), 198-210.
 - [19] Sasou, K., & Reason, J. (1999). Team errors: definition and taxonomy. *Reliability Engineering & System Safety*, 65(1), 1-9.
 - [20] Gross, C., & Kluge, A. (2014). Enhancing shared mental models in teams: A cognitive perspective. *Cognition, Technology & Work*, 16(2), 127-142.