



La place de la prévention et de la connaissance dans la maîtrise des risques

The role of prevention and knowledge in risk control

MERIAN Yves
IMdR Institut pour la Maîtrise des Risques
Paris
yves.merian@orange.fr

GUILLON Thomas
RTE Réseau de Transport d'Électricité
Puteaux
thomas.guillon@rte-france.com

FIGUEROA Lionel
RTE Réseau de Transport d'Électricité
Puteaux
lionel.figueroa@rte-france.com

Résumé — La maîtrise des risques suppose d'adopter la meilleure stratégie basée sur une compréhension claire du problème de risque. Ceci nécessite d'optimiser la stratégie dans ses composantes réparatrices (curative, après l'évènement redouté), réactives (pendant celui-ci) et préventives (en amont pour empêcher sa survenance ou matérialisation). L'expérience industrielle privilégie la prévention, généralement considérée comme plus efficace et moins coûteuse en argent, temps et délai, si elle est bien calibrée. Pour autant, les décideurs et les financeurs restent à convaincre. Devant l'incertitude, la tendance est d'écarter un projet qui peut représenter un investissement conséquent. C'est pourquoi il est nécessaire de présenter une démonstration quantifiée, supposée solide. Mais certains outils, comme la matrice des risques, présentent des résultats sans nuance, sans connaître la solidité des hypothèses qui les sous-tendent. Le choix des solutions est alors un pari dangereux. L'article souligne l'importance d'un cadre pour la prise de décision éclairée par les risques soutenant la connaissance et les préoccupations des parties prenantes qui deviennent des dimensions fondamentales de la maîtrise des risques.

Mots-clefs — *prévention, maîtrise des risques, coût, connaissance, résilience*

Abstract — Risk management involves adopting the best strategy based on a clear understanding of the risk problem. It requires optimizing the strategy in its remedial (curative, after the hazardous event), reactive (during it), and preventive (upstream to prevent its occurrence or materialization) components. Industrial experience favors prevention, as it is generally more effective if adequately calibrated. However, decision-makers and financiers still need to be convinced and tend to dismiss the project when the investment becomes significant. That's why presenting a solid quantified demonstration is necessary. However, some tools, such as the risk matrix, give results without nuance regarding the background knowledge supporting the underlying assumptions. Gambling on solutions for managing risks is dangerous. This article highlights the importance of a risk-informed decision-making framework that strengthens the knowledge and the stakeholders' concerns as fundamental dimensions of risk management.

Keywords — *prevention, risk control, cost, knowledge, resilience*

I. INTRODUCTION

La maîtrise des risques suppose d'adopter le meilleur traitement en fonction du niveau de connaissance relatif à la description du problème de risque. Dans l'idéal, ceci nécessite d'optimiser la stratégie dans ses composantes réparatrices (curative, après l'évènement redouté), réactives (pendant celui-ci) et préventives (en amont pour empêcher sa survenance ou matérialisation). La Covid-19 a montré le gain lié à la remontée progressive de l'aval vers l'amont : du curatif (les soins aux patients atteints), vers le réactif (les masques) et enfin la prévention (la vaccination). L'expérience industrielle va dans le même sens en privilégiant la prévention, généralement considérée comme plus efficace et moins coûteuse en argent, en temps et en délai.

La décision doit être éclairée par les risques, mais dans certaines situations, faute de connaissances suffisantes, il peut être décidé de repousser une approche non étayée représentant un investissement conséquent ou au contraire d'adopter trop facilement une approche faisant illusion. En cas d'un manque de connaissance important, est-il nécessaire d'attendre ou d'agir ? Cette dimension de la connaissance est donc au cœur de la maîtrise des risques.

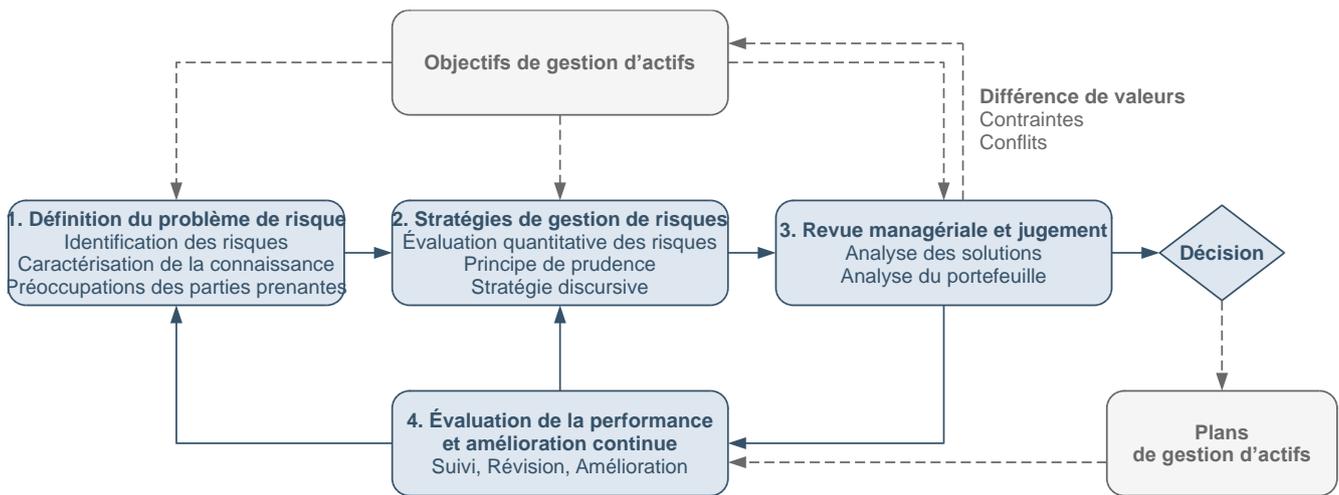


Fig. 1. Processus de décision éclairée par les risques pour la gestion d'actifs (RIDM)

Cet article fait référence à une pratique de décision éclairée par les risques dans le domaine de la gestion d'actifs. Des exemples tirés de ce domaine montrent le besoin de disposer de connaissances validées scientifiquement sous peine de prendre des décisions inappropriées et de tenir compte des préoccupations des parties prenantes. Le croisement avec la question de la connaissance des coûts renforce cette problématique.

L'objet de la communication est de montrer l'importance de prendre en considération les dimensions « connaissance » et « alignement des parties prenantes » pour le choix de la stratégie de gestion de risques et de fournir des approches pour une application effective.

II. PROCESSUS DE DECISION ECLAIREE PAR LES RISQUES POUR LA GESTION D'ACTIFS

Un risque se définit par la combinaison de conséquences dommageables et des incertitudes associées. Les incertitudes peuvent être représentées par une mesure de probabilité et les conséquences quantifiées en valeurs monétaires. Cependant, cette modélisation doit s'appuyer sur une connaissance robuste pour éclairer les décideurs dans leur gestion de risques. En effet, l'incertitude épistémique qui porte sur les modèles, les paramètres ou les méthodes de décision peut conduire à des informations trompeuses et une augmentation du risque. Par exemple, pour une population de matériels qui présente des problèmes de contrôle qualité (jeunesse ou rodage), la mise en œuvre d'une solution de remplacement préventif conduirait à une augmentation du nombre de défaillances. De plus, la mise en œuvre d'une solution de réduction de risques peut générer des contraintes ou des conflits pour les parties prenantes aux risques. Ces situations illustrent une diversité de problèmes de risques en fonction notamment de la connaissance disponible et des préoccupations ou perceptions des parties prenantes.

Durant les deux dernières décennies, la science des risques a défini un cadre concret pour orienter les analystes vers les meilleures stratégies de gestion de risques à proposer aux décideurs (Aven, 2016). La **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** présente un processus de décision éclairée par les risques (Risk-Informed Decision-Making, RIDM) issu des travaux de normalisation en cours au comité technique 123 de la commission électrotechnique internationale (IEC/TC 123), portant sur la gestion d'actifs des réseaux d'énergie électrique. Cette approche fait consensus dans la communauté scientifique et se distingue des décisions « *risk-based* » en accordant une grande importance à la robustesse des hypothèses utilisées dans les études quantitatives (Apostolakis, 2004). Elle est appliquée depuis plus 10 ans dans le secteur du nucléaire (U.S. Nuclear Regulatory Commission : (Caruso, et al., 1999); Commission canadienne de sûreté nucléaire : (CSA Group, 2018) ; et Agence internationale de l'énergie atomique : (IAEA, 2011)), dans le secteur spatial par la NASA (NASA, 2010), ainsi que par des gestionnaires de réseau de transport d'électricité tel qu'Hydro-Québec (Kojljenovic, Abdul-Nour, & Boudreau, 2019).

Ce processus commence par la description du problème de risque (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**, étape 1) avec une analyse de risque qualitative : identification et compréhension des sources, causes, facteurs et contrôles du risque, la caractérisation de la connaissance (données disponibles, compréhension des modes de défaillance, profondeur des conséquences d'une défaillance) puis l'identification des préoccupations des parties prenantes (alignement sur la description des conséquences dommageables, contraintes ou conflits parmi les parties prenantes, réglementation, responsabilité). Cette étape 1 est fondamentale pour déterminer l'importance à accorder à chacune des grandes stratégies de gestion de risques pour proposer des solutions de réduction de risques pertinentes aux décideurs.

En fonction de la définition du problème de risque, trois grandes stratégies de gestion de risques (Aven & Renn, 2020) peuvent être considérées (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**, étape 2) :

- **L'évaluation quantitative des risques** qu'il faut privilégier lorsque la connaissance qui soutient les modèles et les valeurs des paramètres est robuste.
- **Le principe de prudence** qui part d'un constat d'un manque de connaissance (fortes incertitudes) et qui peut venir en complément de l'évaluation quantitative des risques (Aven, 2023). L'objectif est de mettre en œuvre des actions d'amélioration de la connaissance et des mesures temporaires de réduction de risques tels que la protection, l'avertissement, la résilience ou la limitation de l'activité dans l'espace ou dans le temps. Ces mesures peuvent générer des contraintes ou des conflits parmi les parties prenantes.
- **La stratégie discursive** qui relève d'un désalignement des parties prenantes aux risques, notamment par des perceptions différentes du risque, ou des mesures de réduction de risques qui génèrent des contraintes ou conflits.

Ces stratégies sont complémentaires et peuvent s'appliquer conjointement en fonction du problème de risque caractérisé à la première étape.

III. CONNAISSANCE DES COÛTS

La démarche de gestion de risques a nécessairement une dimension financière qui implique une connaissance des coûts suffisante au regard des problèmes posés. Cette dimension ne couvre pas tout, mais constitue un élément nécessaire. Nous abordons ici les aspects directement monétisables, à l'exclusion d'aspects humains comme la valeur de la vie humaine ou l'équilibre entre générations présentes et futures.

A. Identification et mesure des coûts

La gestion de risques distingue la réalisation de dépenses immédiates ou récurrentes en vue d'éviter ou de réduire des coûts futurs incertains, pouvant être importants, voire insupportables. Une démarche rationnelle consiste à optimiser la balance coût-bénéfice.

1) Coût futur incertain

Les coûts futurs peuvent être des dommages aux biens ou des pertes d'activité. Par exemple, un risque naturel peut détruire des installations situées en zone inondable, insuffisamment protégées et entraîner une rupture de la continuité d'activité avec des pertes financières et des conséquences potentielles sur les parts de marché futures. Un risque technologique sur une installation industrielle peut entraîner une indisponibilité intempestive à laquelle il sera long et coûteux de remédier.

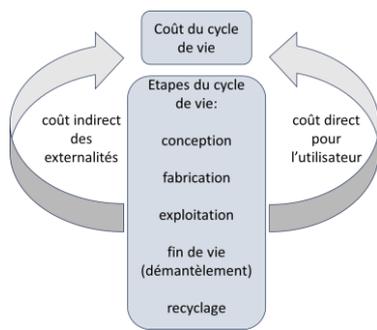
Une partie des coûts futurs est assurable et peut être transférée sur un tiers assureur. La démarche est rationnelle dès lors qu'elle permet de mutualiser les coûts. Mais tout n'est pas assurable pour des raisons tenant aux techniques de l'assurance (caractère aléatoire des événements redoutés et disponibilités de données statistiques utilisables) ou à la nature des coûts (certains dommages ont un caractère irréversible non réparable). Enfin, le plus souvent, la perte future peut s'atténuer par des mesures de prévention ou de gestion de crise ; dans ce cas général, l'assurance n'a de sens, économiquement parlant, que pour couvrir le risque résiduel. Au niveau collectif, il importe de retenir une approche ternaire pour optimiser la répartition entre des stratégies préventives, réactives ou réparatrices :

- Prévention ;
- Gestion de l'urgence (gestion de crise) ;
- Réparation (avec ou sans indemnisation).

Au niveau individuel, les postures peuvent être influencées par le fait que les financeurs ne sont pas les mêmes à ces différents stades (e.g., prise en charge du coût de renouvellement d'un bien par l'entité en prévention et par l'assureur en réparation).

2) Dépense immédiate et récurrente, plus ou moins certaine

Pour réduire ces coûts futurs incertains à un niveau de risque résiduel acceptable, il est généralement nécessaire de réaliser des dépenses pour se protéger contre la survenance des événements redoutés ou leurs effets. Ces dépenses peuvent constituer un investissement initial, notamment au niveau des études de conception et pour la mise en place d'un dispositif approprié. Elles se prolongent par des dépenses récurrentes pour faire vivre le dispositif.



En sûreté de fonctionnement, les coûts peuvent être très importants, que ce soit au stade de la conception des produits, de l'installation ou de la maintenance. Le principe est de retenir un coût complet portant sur l'ensemble du cycle de vie du produit - comprenant la conception, la réalisation et l'exploitation, jusqu'à sa fin de vie, y compris le démantèlement ou le recyclage. Au coût interne pour l'organisme s'ajoute le coût externe lié aux externalités, par exemple, sur l'environnement. Le schéma suivant illustre ce coût du cycle de vie (Fig. 1).

Dans un domaine comme celui de la continuité d'activité, le coût initial correspond à la mise en place d'un plan de continuité de l'activité, suivi d'un coût récurrent au titre de la formation des équipes, de leur entraînement (en particulier sous forme d'exercices de crise), le fonctionnement du réseau et la révision régulière du dispositif.

Fig. 1. Schéma du coût du cycle de vie (d'après la direction des achats de l'Etat)

B. Nature comparative des coûts

Alors que la présentation des budgets est individualisée pour chaque objet, la réalité est que les analyses de coûts sont comparatives, que ce soit de façon explicite ou implicite.

1) Comparaison explicite entre solutions opérationnelles

En sûreté de fonctionnement, les analyses économiques se doivent d'examiner toutes les solutions possibles pour optimiser le produit ou l'installation à l'étude et les traduire en termes de coûts pour éclairer sur le meilleur choix. L'étude économique est réalisée si elle est économiquement justifiée : elle ne le sera pas si la technologie examinée est soumise à une rapide obsolescence. Ce peut être à un niveau plus général de comparer différents types de maintenance : réactive, systématique ou prédictive.

Dans le domaine du risque industriel, le dispositif des plans de prévention de risques technologiques (PPRT) a prévu des études conjointes entre l'industriel, les autorités et la population, grâce auxquelles les industriels peuvent prendre des mesures supplémentaires si celles-ci permettent une diminution des coûts liés aux expropriations ou aux travaux de renforcement des habitations. De même, pour le trait de côte, les études socioéconomiques (France Stratégie, 2017) peuvent comparer sur la durée les coûts respectifs du renforcement des ouvrages de protection (e.g., les digues) et de la relocalisation des habitants menacés à l'arrière de la commune.

2) Comparaison implicite entre faire ou ne pas faire

Pour les décideurs ayant à examiner une demande de budget, la dépense se présente souvent comme isolée, une option supplémentaire à prendre ou à refuser. Comme le choix est soumis à des contraintes de ressources (e.g., budget, main d'œuvre), la nouvelle dépense apparaît en premier lieu comme un surcoût qui peut affecter la compétitivité de l'organisme. En fait, c'est souvent un choix entre le statu quo (faire comme d'habitude) et une nouvelle approche. Une réduction de coût apparaît comme automatiquement avantageuse si les conséquences potentielles sont méconnues : l'exemple de Camp Fire en novembre 2018 en Californie est emblématique. Il existe des méthodes pour évaluer ce qui est économiquement acceptable (e.g., démarche ALARP « *As Low As Reasonably Possible* »).

C. Conclusion : la connaissance des coûts comme partie de la connaissance du problème de risque

Le développement des études socioéconomiques illustre l'effort de plus en plus important pour déterminer les coûts de prévention et des conséquences dans le cadre de la prise de décision. Cette orientation est en principe incontestablement positive afin de mieux objectiver la dimension économique et financière des grands choix.

Cependant, pour que cette démarche soit valide, il faut s'appuyer sur des hypothèses et des modèles robustes sur la connaissance des coûts. A défaut, les effets peuvent être moins favorables, voire fortement négatifs. Or, il convient d'être conscient des biais cognitifs qui peuvent la dénaturer. On discerne particulièrement les biais suivants, dont les deux premiers ont déjà été évoqués ci-dessus :

- Le différentiel de postures tenant à la différence des financeurs entre prévention, urgence et réparation ;
- La réduction des coûts en méconnaissance des conséquences potentielles ;
- La surestimation du quantitatif : les études socioéconomiques à caractère quantitatif rassurent parce que les chiffres sont neutres et a priori objectifs : mais, une évaluation quantitative des risques qui repose sur des hypothèses non valides ou une surinterprétation, n'est qu'une illusion de maîtrise du risque ;
- La tentation du report en cas de méconnaissance des coûts : les prises de décisions sont différées, alors qu'il faudrait au contraire investir rapidement pour éviter de fonctionner à l'aveugle (syndrome du lampadaire).

IV. CARACTERISATION DE LA CONNAISSANCE EN GESTION DE RISQUES

La détermination des coûts associés à un risque (coûts de prévention, de gestion de crise et de réparation) est hautement souhaitable pour justifier la mise en œuvre de solutions de réduction de risques, mais peut être fragilisée par les incertitudes portant sur l'identification et l'estimation. Le processus RIDM pour la gestion d'actifs, décrit en partie II, propose d'évaluer les connaissances qui soutiennent l'analyse de risque et introduit explicitement les stratégies de gestion de risques à considérer en fonction des connaissances disponibles. Cette évaluation se fait principalement à deux endroits :

- Dans l'étape 1, une fois l'identification des risques réalisée, nous évaluons les connaissances relatives au problème de risque, en amont du choix de la stratégie de gestion de risques et d'une potentielle évaluation quantitative des risques (étape 2) ;
- Dans l'étape 2, dans le cas d'une évaluation quantitative des risques, une analyse de la robustesse des connaissances soutenant les calculs est réalisée (e.g., analyse des intervalles de confiance, analyse de sensibilité). Dans le cas d'incertitudes importantes, il peut être décidé de faire appel au principe de prudence en complément de la solution évaluée quantitativement.

A. Dangers de la méconnaissance

Nous pouvons considérer que l'usage de la gestion de risques remonte aux plus anciennes civilisations. Néanmoins, la formalisation des problèmes de risque et du choix de son traitement à l'aide d'outils autres que l'intuition remonte au 17^{ème} siècle avec le développement de la théorie des probabilités. A partir du 18^{ème} siècle, l'évaluation quantitative s'est largement développée dans les domaines des assurances, des banques, des marchés financiers, et de certaines agences gouvernementales. Le développement de méthodes et modèles de plus en plus sophistiqués s'est poursuivi au 20^{ème} siècle, avec l'essor de nouvelles industries à forts enjeux, faisant face à des risques élevés tels que le nucléaire ou la production pétrolière. La fin du 20^{ème} siècle a marqué le début d'une volonté de propager la culture du risque à de nombreuses autres industries. Cette situation a mené, dans certains cas, à l'émergence de nouvelles méthodes, développées au cas par cas, sans connexion avec les théories scientifiques existantes (Hubbard, 2020).

L'un des problèmes centraux de ces méthodes est la recherche de la quantification du risque à tout prix, indépendamment des connaissances soutenant l'analyse. Ces méthodes sont à première vue séduisantes, puisqu'elles permettent souvent de les appliquer sans connaissance théorique, ni données pour la calibration de modèles probabilistes. De plus, ces méthodes sont souvent bien structurées, et parfois très complexes. Il arrive aussi que ces méthodes soient décrites dans des guides, des normes de domaine, des brochures techniques, et validées par des entités extérieures aux industries utilisatrices (e.g., certaines sociétés de consulting ou organismes de régulation), ce qui ajoute un argument d'autorité pour leur utilisation. Malheureusement, il apparaît que certaines d'entre elles reposent sur des hypothèses ambiguës voir erronées.

C'est le cas par exemple de la méthode CNAIM (Common Network Asset Indices Methodology), développée par EA Technology, en collaboration avec des représentants de l'ensemble des gestionnaires des réseaux électriques de distribution (GRD) du Royaume-Uni, et approuvée par leur organisme de régulation, l'OFGEM (Office of Gas and Electricity Markets). Cette méthode est utilisée pour comparer la performance des actifs entre les réseaux de distribution et évaluer la performance de chaque GRD par rapport à une référence établie par l'OFGEM. Le document décrivant la méthodologie est très complet (OFGEM, 2021) et apporte la plupart des informations pour évaluer les risques liés à l'exploitation des actifs. Cette approche clé en main intéresse désormais d'autres gestionnaires de réseaux (e.g., Danemark (Jennrich & Lund, 2021), Japon (Mitsuhiro, Shigeyuki, Masao, & Kouji, 2020)), et son implémentation à des solutions pour le domaine de la gestion d'actifs est d'actualité (Pinto, Blonbou, Lacroix, & De Lumley, 2019), (Sadnicki & Liu, 2019). Hélas, alors que cette méthode a été développée pour répondre à des besoins spécifiques dans un secteur précis, elle ne repose pas sur l'état de l'art des théories scientifiques élaborées depuis des décennies dans les domaines de la fiabilité, des statistiques et probabilités, et de la science des risques. Au-delà des problèmes méthodologiques, certaines ambiguïtés posent des problèmes, par exemple :

- « *L'espérance de vie normale* » est définie « *comme le moment (en années) dans la vie d'un actif où les premiers signes de détérioration significatifs sont attendus* ». Cette notion de « significatif » n'est pas explicitée, et la méthode de calibration de cette espérance de vie est floue et ne s'appuie pas sur les techniques classiques issues du domaine des statistiques de durées de vie ;
- « *La probabilité de défaillance* » (ou « *PoF* » pour « *Probability of Failure* ») est définie comme « *le nombre attendu de défaillances fonctionnelles au cours de l'année* ». Il s'agirait donc d'un terme relatif à une quantité annuelle. Cependant, nous ne savons pas s'il s'agit d'une simple probabilité annuelle de défaillance, notée $P(t < T \leq t + 1)$ ou d'une probabilité annuelle conditionnelle, notée $P(T \leq t + 1 | T > t)$, avec T la variable aléatoire représentant le temps avant défaillance et t l'âge de l'actif. Dans les calculs proposés, certaines situations conduisent à évaluer PoF à des valeurs supérieures à 1, ce qui est incompatible avec une valeur de probabilité et peut laisser penser qu'il s'agit d'une fonction du taux de défaillance, parfois notée $h(t)$. Les valeurs de ces différentes fonctions sont très différentes et doivent être utilisées dans des contextes différents en fonction du problème à résoudre. Ainsi, utiliser une expression à la place d'une autre, conduit à de mauvaises décisions de gestion de risques et de gestion d'actifs.

B. Caractérisation des connaissances

Dans cette section, nous décrivons l'approche utilisée pour l'évaluation des connaissances relatives au problème de risque. Elle repose notamment sur les travaux d'évaluation des connaissances en science des risques (Flage & Aven, 2009; Bani-Mustafa, Flage, Vasseur, Zeng, & Zio, 2020). Les objectifs sont :

- De communiquer à l'ensemble des parties prenantes l'état des connaissances sur lequel repose le problème de risque ;
- D'identifier les domaines pour lesquels les connaissances sont faibles, et donc de clarifier les actions d'amélioration à mettre en œuvre ;
- D'aider les acteurs à s'accorder sur le poids à accorder aux différentes stratégies de gestion de risques.

Des questions sont posées pour procéder à cette évaluation, elles concernent :

- La compréhension des phénomènes ;
- La capacité de modélisation quantitative des phénomènes ;
- La présence d'un consensus.

1) Compréhension des phénomènes

Avant d'envisager une modélisation du problème, il est nécessaire de statuer sur la bonne compréhension des phénomènes en jeu. Le terme « phénomène » désigne ici les éléments décrits lors de l'identification des risques utilisant notamment certaines techniques décrites dans la norme IEC 31010 (International Electrotechnical Commission, 2019), à savoir : les causes menant à l'événement redouté, l'événement redouté considéré, les conséquences de l'événement redouté, et les solutions de réduction des risques (barrières). A ce stade, nous proposons trois questions :

- **Le phénomène a-t-il déjà été observé ?** Certains phénomènes peuvent avoir été observés lors de l'exploitation des actifs du gestionnaire d'actifs ou organismes nationaux ou internationaux similaires. Par exemple, des conséquences sur la sécurité des tiers à la suite de l'explosion d'un matériel du transport d'électricité peuvent avoir été observées et partagées par un autre gestionnaire de réseau. Dans le cas où le phénomène a été observé, la réponse à cette question est accompagnée de références telles que des rapports d'incident, des bilans de comportement, des brochures techniques internationales, des articles de presse, etc.
- **Le phénomène est-il théoriquement possible ou a-t-il été expérimenté ?** Il est possible que le phénomène n'ait jamais été observé pendant les phases d'exploitation mais que son occurrence reste possible. Dans ce cas, la connaissance peut provenir d'études académiques ou de rapports d'essais ;
- **Les différents échantillons ont-ils été clairement identifiés ?** Les connaissances sur les spécificités des actifs étudiés peuvent être prises en compte pour spécifier différents échantillons à considérer dans les stratégies de gestion de risques. Ces spécificités peuvent être de natures technologiques, influant sur le comportement des matériels, des types de conséquences possibles ou en lien avec les mesures de réduction des risques disponibles.

2) Capacité de modélisation quantitative

Avant d'engager une évaluation quantitative des risques, nous cherchons à déterminer la capacité à la réaliser. Cette phase est importante, car elle permet d'orienter sur le choix de la ou les stratégies de gestion de risques à considérer à l'étape 2. Elle est découpée en deux parties :

- Les modèles probabilistes ;
- Les données de calibration.

Dans l'optique d'une approche « *decision-driven* » plutôt que « *data-driven* » (de Langhe & Puntoni, 2021), nous nous intéressons d'abord aux modèles disponibles pour représenter le problème de risque et le problème de décision associé puis aux données nécessaires pour les calibrer. Cette évaluation se fait par le biais des questions suivantes :

- **Existe-t-il des modèles permettant l'évaluation quantitative du problème considéré ?** La description des incertitudes aléatoires passe par l'utilisation de modèles probabilistes. En fonction du contexte, ces modèles peuvent décrire par exemple :
 - Le temps avant l'apparition d'une défaillance non réparable, en utilisant une distribution de durée de vie déterminée à partir de l'analyse de survie ;
 - Le nombre de réparations « *as bad as old* » sur un intervalle de temps donné, en utilisant un processus non-homogène de Poisson ;
 - La dynamique de détérioration d'une variable, en utilisant par exemple un processus Gamma ;
 - Le nombre de remplacement (ou réparation « *as good as new* ») sur un intervalle de temps donné, en utilisant les processus de renouvellement.

Si aucun modèle n'existe, alors le principe de prudence doit être envisagé, et des efforts peuvent être consentis pour développer ce modèle (e.g., ressources R&D, consultants spécialisés, partenariats académiques).

- **Les hypothèses du modèle considéré sont-elles acceptables ?** Chaque modèle repose sur des hypothèses bien spécifiques dont il est nécessaire d'en expliciter les limites. C'est le cas par exemple des processus de renouvellement, permettant de calculer le nombre moyen de remplacements à venir. Les durées de remplacement sont souvent négligées, ce qui peut ne pas être acceptable pour certains types de matériels, dont les durées d'approvisionnement sont longues, lorsque la main d'œuvre de maintenance est peu disponible, ou encore lorsque les conditions d'accès sont défavorables. Si les hypothèses ne sont pas acceptables, alors un travail théorique peut être entrepris pour adapter les modèles aux particularités du problème.
- **Ce modèle est-il disponible au sein de l'entreprise ?** Le terme « modèle disponible » fait référence à un modèle utilisable par les analystes de l'entreprise. Cela sous-entend que sa documentation est complète, que son implémentation a été réalisée, que cela soit dans un outil interne de l'entreprise ou une solution externe (e.g., logiciels du commerce, bibliothèques spécialisées), et que les analystes ont les compétences pour l'utiliser. Si le modèle n'est pas disponible, alors des ressources peuvent être allouées pour faciliter l'implémentation du modèle et la montée en compétences des analystes.
- **Ce modèle a-t-il été déjà utilisé dans d'autres études ?** Cette question permet de juger du niveau de maturité des modèles proposés. Ces études peuvent avoir été réalisées par d'autres industries et publiées dans des revues scientifiques ou des brochures spécialisées. Si ces études ont déjà été réalisées au sein de l'entreprise, cela facilite la compréhension du modèle, sa communication et son utilisation.

Une fois évaluées les connaissances relatives aux modèles probabilistes pertinents, nous nous intéressons aux données disponibles pour les calibrer. En fonction des modèles, les types de données à considérer peuvent varier : par exemple, des données patrimoniales, d'avaries, de coûts, ou de volumes liés aux conséquences des défaillances (e.g., fuites d'huile, énergie non distribuée, rejets de gaz). Dans cette étape 1, nous n'abordons pas les questions relatives à la fiabilité des données (e.g., pertinence, précision, cohérence, unicité, validité), qui seront abordées en étape 2 lors de l'évaluation de la robustesse des connaissances à l'étape 2. Les questions retenues permettent de statuer rapidement sur la question de la faisabilité d'une évaluation quantitative :

- **Les types de données nécessaires à la calibration du modèle sont-ils accessibles ?** Pour répondre à cette question, il est essentiel d'explicitier les types de données permettant la calibration du ou des modèles retenus, puis leur disponibilité et leur accessibilité (e.g., outils, bases de données, données externes ou internes à l'entreprise). Si ces types de données sont disponibles, un travail de nettoyage et de formatage est souvent nécessaire pour permettre leur exploitation par les algorithmes statistiques. Cependant, s'ils ne sont pas disponibles, alors l'entreprise peut appliquer le principe de prudence, avec notamment la mise en place d'un programme de collecte des données pertinentes, permettant à terme, de réaliser une évaluation quantitative des risques.
- **Les données sont-elles représentatives du type d'actifs étudié ?** Si les données sont disponibles, alors il faut s'assurer qu'elles décrivent bien les gisements d'actifs du problème de risque. En effet, certaines données, telles que les observations d'avaries peuvent concerner d'anciennes technologies d'actifs et ne sont pas représentatives du comportement des matériels actuels. Dans ce cas, il peut être décidé de réaliser une évaluation quantitative sur l'ancienne technologie, et de gérer les risques sur le cycle en cours en attendant de collecter davantage d'observations sur la nouvelle technologie.

3) Présence d'un consensus

La vérification de la présence d'un consensus est un élément crucial dans l'évaluation des connaissances. Cette vérification est réalisée sur les aspects détaillés précédemment : la compréhension des phénomènes (IV.B.1)), la pertinence de modèles probabilistes et la disponibilité de données de calibration appropriées (IV.B.2)). Nous proposons alors la question suivante : **Les aspects précédents font-ils l'objet d'un consensus parmi les acteurs concernés ?**

L'intérêt est de permettre l'échange entre les différents acteurs et d'identifier des points de divergences. Ces désaccords peuvent être synonymes d'incompréhensions liées à un manque de connaissances ou de compétences, à la présence de biais cognitifs, à un défaut de communication, ou simplement une différence de point de vue et de sensibilité (e.g., sur l'acceptabilité des hypothèses du modèle pour la modélisation du problème). Dans ce cas, la stratégie discursive doit être envisagée afin de lever les ambiguïtés et clarifier les faits.

C. Impact de la méconnaissance sur le processus de décision

Cette partie illustre avec un cas d'étude, l'impact d'une méconnaissance de certaines informations conduisant à des prévisions erronées et donc à de mauvaises décisions de gestion d'actifs. Elle porte sur la robustesse des connaissances soutenant une évaluation quantitative des risques (étape 2 du processus RIDM) et s'inspire d'un cas rencontré par RTE. Sur un parc de plus d'un millier d'actifs homogènes, l'objectif est d'évaluer l'impact d'une stratégie de maintenance corrective « *run-to-failure* » afin d'anticiper les ressources à prévoir (e.g., stock de matériels, coûts, main-d'œuvre). Pour cela, un échantillon de durées de vie a été constitué et intègre les informations suivantes :

- Les observations de durées de vie sur une dizaine d'années, incluant les âges des matériels dont les avaries ont été observées, les âges des matériels toujours en fonctionnement au moment de l'étude (observations censurées à droite), et les âges des matériels au début de la période d'observation (observations tronquées à gauche) ;

- Les coûts de remplacement de chaque actif ;
- Les coûts des conséquences des avaries, incluant les coûts réels et sociétaux, pour chaque actif.

Cependant, près de la moitié des observations de défaillance étaient incertaines (44 observations). Ces 44 matériels ont été remplacés, mais l'incertitude porte sur leur critère de remplacement : ont-ils été réellement remplacés à la suite d'une avarie, ou préventivement par opportunisme (censures à droite) ? Nous avons alors considéré deux échantillons construits à partir des deux hypothèses extrêmes : ces 44 matériels ont tous été défaillants au moment de leur remplacement (hyp.1) ou ces matériels ont tous été remplacés préventivement (hyp.2). La Fig. 2 représente l'estimation de la probabilité de survie en fonction de l'âge de l'actif selon les deux hypothèses, en utilisant l'estimateur non-paramétrique de Kaplan-Meier (EKM) et l'estimateur paramétrique du Maximum de Vraisemblance (EMV) associé à une distribution de Gompertz. Au-delà d'une quarantaine d'années, les fonctions de survie sont en écart et les espérances de vie sont très différentes, 65 ans pour hyp.1 et 89 ans pour hyp.2.

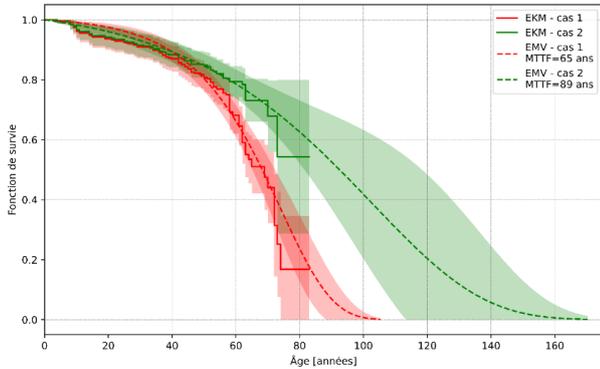


Fig. 2. Résultats de l'analyse de survie selon la signification du critère de remplacement (hyp.1 ou hyp.2)

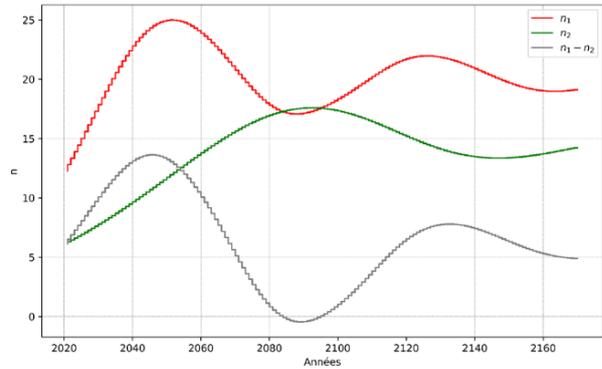


Fig. 3. Prévision du nombre moyen de remplacements à prévoir selon hyp.1 (n_1) ou hyp.2 (n_2)

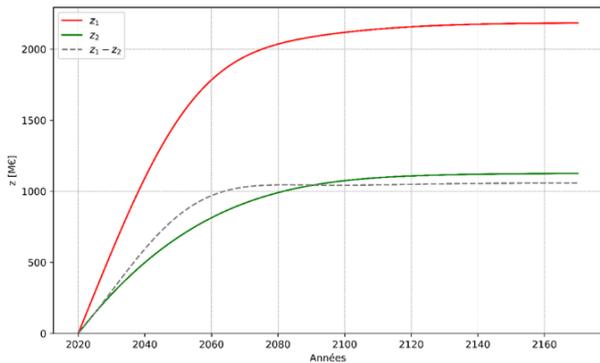


Fig. 4. Prévision des coûts actualisés cumulés moyens selon hyp.1 (z_1) ou hyp.2 (z_2)

TABLE I. PREVISION SUR LES 15 PROCHAINES ANNEES

Hyp.	z [M€]	n (cumulé)
1	432	105
2	212	50

L'étude de la dynamique du nombre de défaillances à venir, en utilisant la théorie des processus de renouvellement, détermine le nombre de remplacements sur avarie à prévoir. La Fig. 3 présente la prévision du nombre moyen de remplacements selon les deux cas entre 2020 et 2170 et la Fig. 4 les coûts actualisés moyens cumulés correspondants. Le Tab.1 présente les résultats obtenus sur les 15 prochaines années.

Les prévisions des nombres de défaillances et de remplacements peuvent aller du simple au double en fonction des périodes. Les durées d'approvisionnement étant supérieures à 18 mois et les coûts unitaires étant de plusieurs millions d'euros, une mauvaise prévision conduirait nécessairement à des difficultés importantes avec une sous-estimation ou surestimation des ressources nécessaires (matériels et main-d'œuvre). L'écart de coûts actualisés cumulés entre les deux hypothèses est considérable, environ 1 milliard d'euros. Ces coûts sont pris en compte lors de l'évaluation des budgets nécessaires à l'exploitation de ces matériels selon une stratégie de remplacement sur avarie (e.g., achat de matériels, dédommagement). Ils tiennent aussi compte des coûts sociétaux valorisant les efforts consentis par l'organisme pour réduire l'impact de certaines conséquences, et reflètent son niveau de performance dans ces domaines.

Cette étude met donc en évidence l'importance d'investir des ressources pour améliorer la connaissance et la rentabilité des décisions. Ce travail a permis de justifier la mise en place de ressources pour statuer sur la véritable nature des remplacements de ces 44 actifs. Finalement, 22 observations ont finalement été associées à des remplacements préventifs et ont été traitées comme des censures à droite.

V. RECHERCHE D'UN NOUVEL OUTIL POUR REPRESENTER L'APPRECIATION DES RISQUES

Nous avons identifié le dilemme des décideurs lorsque la connaissance disponible sur un risque est faible : faut-il investir pour améliorer la connaissance, prendre des décisions sur la base de modèles non validés ou se concentrer sur des mesures de réduction des conséquences dommageables en cas d'apparition de l'événement redouté ? Le processus RIDM présenté en première partie forme un cadre qui permet d'apporter la réponse adéquate en fonction du contexte. Les parties précédentes ont souligné l'importance de la prise en compte de la connaissance pour prendre des décisions cohérentes pour la maîtrise des risques. La présente section détaille la première étape fondamentale du processus RIDM dans le cadre de la gestion d'actifs pour s'orienter vers les stratégies de gestion de risques les plus pertinentes.

A. Définition du problème de risque

La définition du problème de risque commence par l'identification des risques, c'est-à-dire, une approche qualitative visant à expliciter de la manière la plus complète possible :

- Les événements redoutés ;
- Leurs conséquences dommageables (relativement aux objectifs de l'organisme) ;
- Les causes, sources ou facteurs potentiels déclencheurs des événements ;
- Les barrières de réduction des risques envisageables.

À ce stade de l'étude, l'analyse est principalement qualitative et ne repose pas sur l'usage de probabilités, de fréquences ou sur la prise en compte d'échelles de gravité des conséquences, qu'elles soient estimées à dire d'expert ou par des calculs statistiques. Différentes techniques décrites dans la norme IEC 31010 peuvent être mises en œuvre pour approfondir cette analyse (e.g., Méthode Delphi, AMDEC, Arbre de défaillance). Les résultats peuvent par exemple être communiqués à l'aide d'un diagramme en nœud papillon.

La deuxième étape de la définition du problème de risque concerne la caractérisation de la connaissance qui a été décrite en partie IV, et dont l'objectif est d'identifier et communiquer sur :

- La compréhension des phénomènes issus de l'identification des risques ;
- Les possibilités de modélisation quantitative ;
- La présence d'un consensus parmi les analystes.

Enfin, le problème de risque dépend également de la position des parties prenantes internes et externes dont les préoccupations peuvent notamment traduire :

- La découverte d'un nouvel élément sur l'identification des risques concernant un événement redouté, ses causes ou ses conséquences ;
- Une différence dans la perception du risque entre les parties prenantes ;
- Une différence de valeurs ou d'objectifs entre les parties prenantes, notamment sur les conséquences du risque ;
- L'existence de contraintes ou de conflits dans la mise en œuvre des décisions éclairées par le risque (action d'amélioration de la connaissance ou solutions de réduction de risques).

La dernière étape consiste donc à prendre en compte ces préoccupations pour s'assurer que les mesures de réduction seront en adéquation avec les attentes des parties prenantes. En effet, les différences de perception, de valeurs ou la présence de contraintes vont inévitablement perturber ou mettre en échec la mise en œuvre de solutions de réduction de risques décidées indépendamment de ces considérations.

Ainsi, la définition du problème de risque est un préalable indispensable au développement de toute analyse ou représentation quantitative ou semi-quantitative. Cet état des lieux du risque permet ensuite de déterminer les efforts à consacrer à chacune des trois grandes stratégies de gestion de risques et de proposer des actions cohérentes en fonction de la description du risque, des connaissances qui soutiennent cette description et des préoccupations exprimées par les parties prenantes.

B. Limites des approches quantitatives et de la matrice des risques

L'évaluation quantitative de risques est souvent privilégiée afin de justifier les décisions portant sur la gestion de risques (avec la mise en œuvre de solutions de réduction de risque ou non), indépendamment de la robustesse de la connaissance qui soutient les hypothèses des modèles ou les valeurs des paramètres. Dans ce cas, nous avons pu constater dans les parties précédentes que les décisions qui reposent sur ces approches pouvaient alors nuire à la maîtrise des risques.

La matrice des risques est un outil simple et visuel qui permet de hiérarchiser les risques identifiés en fonction de leur fréquence et de leur gravité (voir Fig. 5). Cet outil est très répandu et il a au moins la vertu de pousser les organismes à s'intéresser aux risques et à leurs éventuels traitements.

Cependant la simplicité de l'outil cache des hypothèses, approximations et raccourcis d'interprétation qui peuvent conduire à des décisions allant dans de mauvaises directions. Considérons tout d'abord que la matrice de risques appartient à la famille des approches quantitatives, éventuellement dans une version dégradée lorsque la gravité et la vraisemblance sont exprimées sur une échelle ordinale. Il existe depuis plusieurs années quelques analyses et retours d'expérience négatifs issus de la communauté scientifique (Cox, 2008; Thomas, Bratvold, & Eric Bickel, 2014; Aven, 2017; Thekdi & Aven, 2023), notamment à cause des ambiguïtés suivantes :

- Sur quel horizon de temps considère-t-on la vraisemblance d'un événement ? Comment prendre en compte le fait que la probabilité augmente avec le temps, comme dans le cas du vieillissement d'un matériel ?
- Quelle est la sensibilité du choix des seuils de gravité et de vraisemblance sur l'appréciation du risque ?
- Comment prendre en compte le coût de la mise en œuvre des solutions de réduction de risque ? Faut-il traiter un risque rouge à tout prix ?
- Est-ce que plusieurs risques orange restent toujours moins graves qu'un risque rouge ?
- Comment considérer des risques dans la matrice dont la solidité de la connaissance qui a conduit à une certaine classification est très solide pour l'un et très incertaine pour l'autre ?

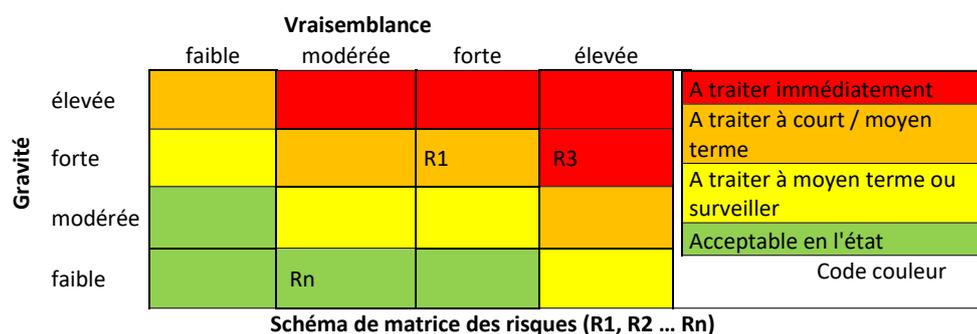


Fig. 5. Exemple d'une matrice des risques traditionnelle

Par ailleurs, l'objectif de prioriser les risques est questionnable. Au stade de la définition préalable du problème de risque, tous les risques sont considérés, et ne sont pas priorisés. L'objectif n'est pas de rechercher l'optimalité mais de limiter les facteurs déclencheurs d'un événement et ou ses conséquences indésirables. Dans l'idéal, tous les risques seront à traiter par le prisme des trois stratégies (quantitative, prudentielle et discursive). En première intention, des mesures temporaires fondées sur le principe de prudence seront au moins retenues, qui reposent, par exemple, sur une analyse de vulnérabilité pour envisager des pistes vers la résilience.

Ainsi, il apparaît que la matrice des risques offre une information partielle, insuffisante pour éclairer les enjeux liés aux risques étudiés, en particulier sur la connaissance et le rôle des parties prenantes. Fonder des décisions sur la présentation d'un tel outil sans prise de recul préalable sur sa réelle portée n'est pas acceptable. Elle constitue davantage un outil de communication que de décision. De manière plus générale, les approches quantitatives sont souhaitables lorsqu'elles permettent de déterminer l'équilibre optimal entre les coûts et les risques, tel que l'âge de remplacement optimal d'un matériel en s'appuyant sur la théorie de la fiabilité.

Cependant, lorsque la connaissance est insuffisante, l'approche de gestion de risques doit permettre d'orienter la décision d'investir des ressources en vue d'améliorer cette connaissance. L'incertitude est représentée avec un modèle de probabilité et le spectre et l'amplitude des conséquences indésirables sont précisés. Enfin, dans le cas d'événements caractérisés par avec une très faible probabilité d'apparition mais dont les conséquences sont catastrophiques (e.g., avec un caractère irréversible non réparable), les approches quantitatives cherchant à minimiser l'espérance d'une fonction de coût socioéconomique conduisent à des actions qui ne sont pas à la mesure des conséquences. Ces tempêtes parfaites (« *perfect storm* ») doivent être considérées par d'autres approches, notamment en invoquant le principe de prudence (Paté-Cornell, 2012).

C. Stratégies de gestion de risques complémentaires en fonction du contexte

Au-delà des fragilités des méthodes identifiées dans les discussions précédentes, la prise en compte des risques, même avec des outils inadaptés, constitue une première étape pour l'amélioration de la culture du risque dans l'organisme, ce qui est préférable à les ignorer totalement. Cependant, pour progresser sur une maîtrise des risques efficace, le cadre de travail doit orienter les analystes vers les stratégies de gestion de risques les plus adéquates en fonction du contexte. Grâce à la définition du problème de risque présenté dans le cas du processus RIDM, nous prenons en compte les éléments essentiels pour éclairer les décideurs sur la pertinence des actions à mener :

- L'identification des risques ;
- La connaissance associée et notamment les perspectives de modélisation quantitatives qui permettront de justifier des dépenses et de rechercher l'optimalité ;

- Les préoccupations des parties prenantes afin de capter de nouvelles informations et de s’assurer d’une mise en œuvre adaptée des solutions de réduction de risques prenant en compte les contraintes et permettant d’éviter les conflits nuisibles à l’efficacité de la gestion de risques.

Les résultats de cette première étape du RIDM sur le problème de risque permettent de déterminer les efforts à consacrer à chacune des trois grandes stratégies de gestion de risques, seules ou combinées, et de proposer des actions cohérentes. Le consensus sur l’existence d’un modèle et de données adaptées conduit à mener une évaluation quantitative des risques afin de comparer différentes solutions de réduction de risques : ne rien faire, remplacement préventif par âge, remplacement conditionnel par inspection de détérioration, déploiement d’un correctif, etc.

L’absence de consensus sur la description du risque, la modélisation ou les données nécessaires ou encore l’existence d’événements aux conséquences catastrophiques requiert l’application du principe de prudence avec d’une part des actions pour améliorer la connaissance (e.g., recueil d’informations auprès de fournisseurs ou d’autres organismes, travaux de R&D en modélisation ou expérimentation, collecte de données) et d’autre part, la recherche de mesures éventuellement temporaires et spécifiques pour réduire le risque.

L’expression de préoccupations des parties prenantes concernant des différences de perception ou de valeurs, de contraintes ou de conflits nécessite de mettre en œuvre la stratégie discursive afin de partager les connaissances, les croyances, les objectifs et de rechercher un compromis pour résoudre les contraintes ou les conflits.

Ces trois stratégies sont complémentaires : l’évaluation quantitative des risques est souvent souhaitable ou nécessaire pour éclairer et justifier des investissements auprès des décideurs et des parties prenantes. Cependant, les modèles peuvent être des représentations trop réductrices des risques réels et le principe de prudence s’impose pour couvrir ces fragilités. Enfin, les préoccupations des parties prenantes remontées aux analystes requièrent une attention particulière pour la stratégie discursive, notamment pour résoudre les problèmes liés aux perceptions ou objectifs différents et à l’existence de contraintes ou de conflits concernant la mise en œuvre de solutions de réduction de risques. Ainsi, les auteurs suggèrent de synthétiser les résultats de l’étape 1 du RIDM sous la forme d’un tableau, afin de dépasser les limites des outils usuels focalisés sur une estimation, potentiellement trompeuse à ce stade, de la vraisemblance et de la gravité.

L’approche proposée ici oriente les analystes sur l’importance à accorder aux différentes stratégies de gestion de risques de l’étape 2 en prenant en compte les spécificités du problème de risque et facilite la communication des résultats aux parties prenantes. Le Tab.2 propose un exemple de tableau de synthèse de l’étape 1 portant sur le type d’actifs « Disjoncteurs HT ». Dans ce tableau, la caractérisation des connaissances, reprenant les aspects décrits au chapitre IV.B, est synthétisée sous la forme d’une classification binaire (« satisfaisant » ou « non satisfaisant »). Dans cet exemple, « non satisfaisant » implique qu’il est nécessaire d’améliorer la connaissance sur l’aspect concerné avant d’envisager toute évaluation quantitative. L’aspect « Présence d’un consensus » est intégré aux aspects précédents (« Compréhension des phénomènes » et « Capacité de modélisation quantitative »). Ainsi, s’il existe une absence de consensus pour l’un de ces aspects, alors la connaissance sera jugée « non satisfaisante ». Des exemples de critères de classification sont proposés dans (Flage & Aven, 2009).

TABLE II. EXEMPLE DE SYNTHESE DES RESULTATS DE LA DESCRIPTION DU PROBLEME DE RISQUE

Type d’actifs	Evènement redouté	Compréhension des phénomènes	Capacité de modélisation quantitative	Préoccupations des parties prenantes	Stratégies de gestion de risques privilégiées
DJ HT	Défaillance non réparable	Satisfaisant	Satisfaisant	<p>Exploitation Inquiétude sur l’occurrence de plusieurs défaillances dans une même zone.</p> <p>Ingénierie Contraintes sur les capacités des fournisseurs dans les 5 prochaines années.</p>	<p>Evaluation quantitative Sélection de solutions à comparer, probabilités de défaillance, monétisation des conséquences, prévisions des ressources.</p> <p>Principe de prudence Mise à jour des référentiels pour gérer l’apparition de multiples défaillances dans une zone.</p>
DJ HT	Rejet de SF6	Satisfaisant	Non satisfaisant Données nécessaires à la calibration du modèle non accessibles.	<p>Maintenance Contraintes de ressources en cas de rejets fréquents.</p>	<p>Principe de prudence Amélioration de la connaissance et collecte de données pour optimiser les remplacements préventifs. Réorganisation des équipes de maintenances et action de maintenance opportuniste dans la zone.</p> <p>Stratégie discursive Révision des objectifs ou augmentation des ressources pour maintenir l’actif en fonctionnement.</p>

VI. CONCLUSION

La communication présente le processus de décision éclairée par les risques tel que formalisé pour la gestion d'actifs et qui fait consensus dans la communauté scientifique en accordant une grande importance à la robustesse des hypothèses utilisées dans les études quantitatives.

Elle montre la place éminente et souvent méconnue de la dimension « connaissance » dans la maîtrise des risques. Les exemples concrets tirés de la gestion d'actifs illustrent le besoin de disposer de connaissances solides scientifiquement sous peine de prendre des décisions inappropriées voire dangereuses. Le développement des études de coût à caractère quantitatif doit participer à ce questionnement : il est utile, mais peut aussi créer une illusion de maîtrise des risques.

La communication souligne l'importance de la caractérisation préalable de la connaissance afin d'orienter les analystes vers des actions pertinentes. Il convient de disposer d'un processus de décision éclairée par les risques qui soit structuré pour intégrer cette dimension « connaissance ». Il est nécessaire de prendre en compte clairement l'état de la connaissance avant de choisir entre les différentes options de traitement des risques. Cet état doit faire l'objet d'une évaluation pour savoir si la connaissance disponible est forte ou faible. En cas de faiblesse, des stratégies sont à mettre en œuvre immédiatement pour sortir d'une incertitude qui peut s'avérer dangereuse, en combinant l'application d'un « principe de prudence » et la prise en compte des « préoccupations des parties prenantes ».

Un outil, dépassant les limites des matrices des risques classiques « vraisemblance x gravité », est proposé pour synthétiser l'état de la connaissance relative au problème de risque, et pour orienter sur les efforts à consentir sur les différentes stratégies de gestion de risques : évaluation quantitative, principe de prudence et stratégie discursive.

* *
*

VII. REFERENCES

- Apostolakis, G. E. (2004). How useful is quantitative risk assessment? *Risk Analysis: An International Journal*, 24(3), 515-520.
- Aven, T. (2016). Risk Assessment and Risk Management Review of Recent Advances on Their Foundation. *European Journal of Operational Research*, 253, 1-13.
- Aven, T. (2017). Improving risk characterisations in practical situations by highlighting knowledge aspects, with applications to risk matrices. *Reliability Engineering & System Safety*, 167, 42-48.
- Aven, T. (2023). A risk and safety science perspective on the precautionary principle. *Safety Science*, 165.
- Aven, T., & Renn, O. (2020). Some foundational issues related to risk governance and different types of risks. *Journal of Risk Research*, 23(9), 1121-1134.
- Bani-Mustafa, T., Flage, R., Vasseur, D., Zeng, Z., & Zio, E. (2020). An extended method for evaluating assumptions deviations in quantitative risk assessment and its application to external flooding risk assessment of a nuclear power plant. *Reliability Engineering & System Safety*, 200.
- Caruso, M. A., Cheok, M. C., Cunningham, M. A., Holahan, G. M., King, T. L., Parry, G. W., & ... & Thadani, A. C. (1999). An approach for using risk assessment in risk-informed decisions on plant-specific changes to the licensing basis. *Reliability Engineering & System Safety*, 63(3), 231-242.
- Cox, L. (2008). What's wrong with risk matrices? *Risk Analysis: An International Journal*, 28(2), 497-512.
- CSA Group. (2018). *Risk-Informed Decision Making for Nuclear Power Plants*. Ottawa.
- de Langhe, B., & Puntoni, S. (2021). Leading with decision-driven data analytics. *MIT Sloan Management Review*. 62(3), 1-4.
- Flage, R., & Aven, T. (2009). Expressing and communicating uncertainty in relation to quantitative risk analysis. *Reliability: Theory & Applications*. 4(2-1 (13)), 9-18.
- France Stratégie. (2017). *Guide de l'évaluation socioéconomique des investissements publics*.
- Hubbard, D. W. (2020). *The failure of risk management: Why it's broken and how to fix it*. John Wiley & Sons.
- IAEA. (2011). *Framework for an Integrated Risk Informed Decision Making Process*. International Atomic Energy Agency.
- International Electrotechnical Commission. (2019). *IEC 31010 Management du risque – Techniques d'appréciation du risque*. IEC.
- Jennrich, F., & Lund, C. (2021). Applying cnaim to other countries – example Denmark. *The 26th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution* (pp. 2804-2807). Online Conference: CIRED. doi:10.1049/icp.2021.1487
- Komljenovic, D., Abdul-Nour, G., & Boudreau, J. F. (2019). Risk-informed decision-making in asset management as a complex adaptive system of systems. *International Journal of Strategic Engineering Asset Management*, 3(3), 198-238.
- Mitsuhiro, N., Shigeyuki, T., Masao, N., & Kouji, M. (2020, September). Approach to asset management of substation equipment in Japan. *2020 International Symposium on Electrical Insulating Materials (ISEIM)* (pp. 68-71). IEEE.
- NASA. (2010). *NASA Risk-Informed Decision-Making Handbook*. Office of Safety and Mission Assurances.
- OFGEM. (2021). *DNO Common Network Asset Indices Methodology*. OFGEM UK.
- Paté-Cornell, E. (2012). On “black swans” and “perfect storms”: Risk analysis and management when statistics are not enough. *Risk Analysis: An International Journal*, 32(11), 1823-1833.
- Pinto, O., Blonbou, F., Lacroix, T., & De Lumley, T. (2019). Nexans Strategic Asset Management Solution: The powerful decision making platform dedicated to DSOs.
- Sadnicki, S., & Liu, S. (2019). CNAIM Asset Risk Modelling–Implementation and Opportunities.
- Thekdi, S., & Aven, T. .. (2023). Is risk analysis a source of misinformation? The undermining effects of uncertainty on credibility. *Safety science*, 163.
- Thomas, P., Bratvold, R. B., & Eric Bickel, J. (2014). The risk of using risk matrices. *SPE Economics & Management*, 6(02), 56-66.