

ESTIMATION DES RISQUES MACHINES

Recensement des méthodes et subjectivité des paramètres de l'estimation

Les risques liés aux machines continuent de provoquer des accidents graves dans l'industrie. Pour y faire face, une des conditions est de concevoir des machines sûres. La première étape de la démarche de prévention en conception conduit à analyser l'ensemble des risques susceptibles d'affecter les travailleurs qui interagissent avec ces machines, à les estimer et à les évaluer, pour être ainsi en mesure de définir une stratégie pour les réduire.

Le processus proposé par les normes a été largement décliné dans différents guides issus d'organismes de prévention. Il a semblé intéressant à l'INRS et à l'Institut de recherche Robert Sauvé en santé et sécurité du travail (IRSST, Québec) de mener une étude bibliographique de grande ampleur sur les méthodes d'estimation du risque. Cette étude a mis en avant la prépondérance des méthodes matricielles pour la détermination du niveau de risque, mais aussi de grandes diversités dans les paramètres utilisés et les termes les décrivant. Elle montre ainsi une adaptation des concepts normatifs.

Une autre partie de nos travaux s'est intéressée à la difficulté pour l'expert de saisir les valeurs des différents paramètres entrant dans l'estimation des risques; par exemple, placer une durée d'exposition au risque de 6 heures sur une échelle discrète à 4 niveaux : 2h/4h/8h/20h par semaine. Nous avons appliqué les techniques possibilistes pour introduire l'imprécision sur les valeurs à affecter aux données d'entrée de l'estimation. Un outil logiciel a été développé, qui facilite la hiérarchisation des risques et fournit une tendance pour le niveau de risque. En outre, il permet d'avoir un passage progressif entre chaque niveau de risque.

Dans le domaine de la prévention des accidents du travail liés à l'utilisation d'une machine (cf. Figure 1), il est nécessaire de dérouler un processus global d'analyse des risques pour juger si les objectifs de réduction du risque ont été atteints.

Plus particulièrement, dans le cadre de la phase de conception des machines, la directive européenne Machine 98/37/CE [1] (2006/42/CE à partir du 29 décembre 2009), par les exigences essentielles de sécurité qu'elle contient, précise par exemple que « Les machines doivent, par construction, être aptes à assurer leur fonction, à être réglées et entretenues sans que les personnes soient exposées à un risque lorsque ces opérations

sont effectuées dans les conditions prévues par le fabricant ».

Classiquement, et selon la norme EN ISO 14121-1 [2], l'appréciation des risques (cf. Figure 2) consiste à déterminer les limites de la machine, puis à identifier les phénomènes dangereux et à estimer les risques inhérents à chacun de ces phénomènes. À partir de l'estimation des risques associés à chaque phénomène dangereux, il est alors possible de procéder à une hiérarchisation préalable des risques et donc des actions afin de choisir les mesures à appliquer pour réduire les risques. Le processus proposé est itératif, dans le but de s'assurer que les mesures mises en œuvre ont effectivement les effets escomptés.

- Machine
- Estimation des risques
- Méthodologie

► Pascal LAMY, Philippe CHARPENTIER, INRS, département Ingénierie des équipements de travail

MACHINERY RISK ASSESSMENT – SURVEY OF METHODS AND SUBJECTIVITY OF ASSESSMENT PARAMETERS

Serious accidents are still caused by machinery-related risks in industry. One of the conditions for dealing with this problem is to design safe machines. At design stage, the first step of the prevention approach involves analysing all the risks likely to affect workers interacting with machinery, estimating and assessing these risks to develop a strategy aimed at reducing the risks.

The process proposed by the relevant standards has been extensively described in the various guides issued by prevention organisations. Occupational health and safety institutes INRS and Robert Sauvé Research Institute (IRSST, Quebec) have considered a large-scale bibliographical study on risk assessment methods to be of significance. This study has underlined the predominance of matrix methods for determining risk levels, as well as a large variety in the parameters employed and in the terms which describe them. The study therefore reveals an adaptation of normative concepts.

Another part of our work focuses on the difficulty for experts to integrate the values of the different parameters used in risk assessment. For instance, placing a risk exposure time of 6 hours on a 4-level discrete scale - 2h/4h/8h/20h per week. We have applied probabilistic techniques for introducing the inaccuracy applicable to the values allocated to assessment input data. A software tool has been developed for facilitating risk ranking and provides a trend for the risk level. Furthermore, this tool ensures a gradual transition between each risk level.

- Machinery
- Risk assessment
- Methodology

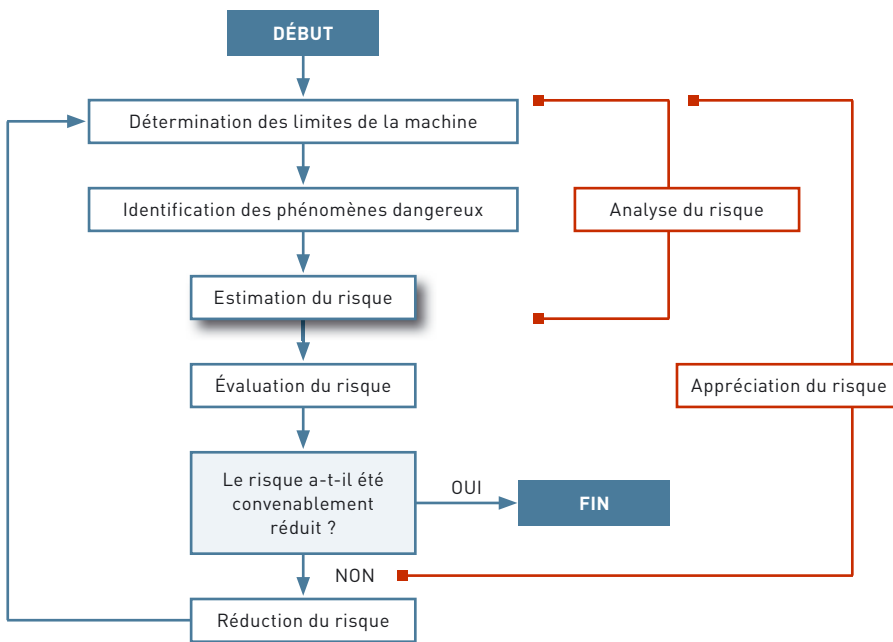
FIGURE 1

Un centre d'usinage pour le bois



FIGURE 2

Processus d'analyse et d'appréciation du risque (d'après [2])



Ce processus est difficilement utilisable tel quel. En effet, il décrit les grandes lignes de ce que doit être une analyse des risques, mais ne donne pas suffisamment de détails pour être réellement exploitable dans les entreprises. En particulier pour la phase d'estimation des risques qui, en suivant la norme ISO 14121-1, consiste à déterminer un niveau de risque à partir d'une combinaison des éléments suivants¹ :

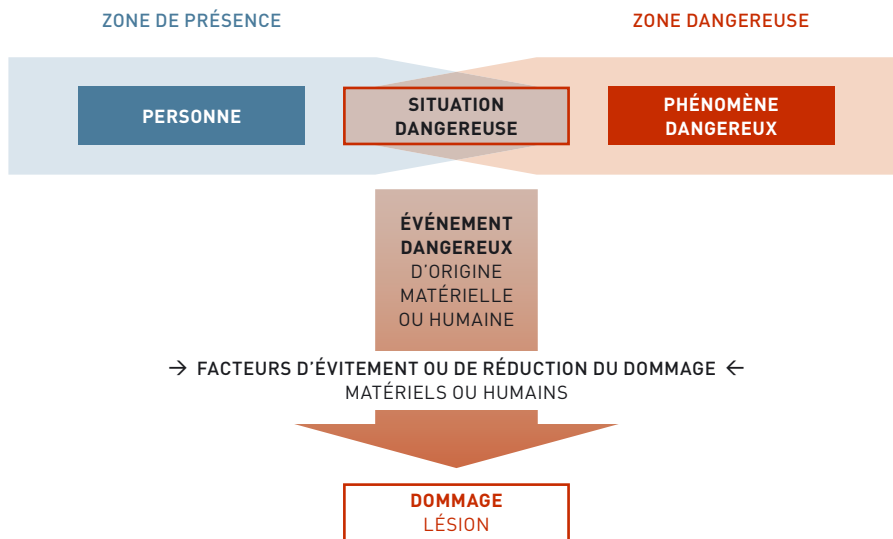
- la gravité du dommage,
- la probabilité d'occurrence de ce dommage qui est une fonction de :
 - l'exposition de la ou des personnes au phénomène dangereux,
 - l'occurrence d'un événement dangereux,
 - les possibilités techniques et humaines d'éviter ou de limiter le dommage.

Dans le cadre d'un processus accidentel soudain et inattendu, l'enchaînement menant au dommage et donc le risque peut être représenté par la Figure 3 [3]. Si l'opérateur est exposé (notion de fréquence, durée d'exposition) à un phénomène dangereux de type énergie ou éléments mobiles, il se trouve alors en situation dangereuse. Par exemple, dans le cas d'une opération de maintenance nécessitant de manutentionner et lever une charge de 150 kg et de la laisser en suspens, l'intervention de l'opérateur, s'il vient à être présent sous la charge, constitue la situation dangereuse ; le phénomène dangereux étant lié à l'énergie potentielle due à la charge en suspens. Si un événement dangereux se produit (probabilité d'occurrence de l'événement dangereux), par exemple contact avec un conducteur sous tension ou contact avec une partie tournante et plus particulièrement dans notre cas rupture du dispositif de maintien de la charge, et active le mécanisme de l'accident, cet événement dangereux pourra entraîner un dommage (notion de gravité du dommage et probabilité d'occurrence du dommage) si les facteurs d'évitement ou de réduction du dommage sont insuffisants (possibilité d'évitement du dommage).

¹ Dans la suite de ce document, on appellera ces éléments "composantes" ou "paramètres" du risque.

FIGURE 3

Processus accidentel menant au dommage



Pour l'estimation de la gravité, la norme propose de s'interroger sur :

- la nature de ce qui est à protéger : personnes, biens, environnement,
- la gravité des lésions ou de l'atteinte à la santé : légères (généralement réversibles), graves (généralement irréversibles), décès,
- l'importance du dommage (pour chaque phénomène dangereux) : une personne, plusieurs personnes.

Pour cet élément du risque, la norme propose des voies d'estimation, mais :

- toutes ces voies ne sont peut-être pas applicables : on peut ne s'intéresser par exemple qu'à la protection des personnes,
- les niveaux d'estimation proposés peuvent être mal adaptés : on peut par exemple souhaiter estimer la gravité des lésions sur un nombre plus ou moins important de niveaux.

Les critères pertinents et la façon dont il faudra les qualifier doivent donc être choisis. Cette nécessaire appropriation a conduit de nombreux organismes à proposer des outils, basés sur les concepts théoriques définis dans les normes internationales, pour aider les concepteurs et les utilisateurs à appliquer le processus d'appréciation des risques associés aux machines industrielles.

Compte tenu de cette diversité, il a semblé intéressant à l'INRS et à l'IRSST²

de mener, dans le cadre d'un partenariat, une étude bibliographique sur les méthodes d'estimation des risques existantes [4, 5]. L'objectif était de dresser les grandes caractéristiques des méthodes généralement utilisées, pour guider les concepteurs et utilisateurs, soit dans le choix d'une méthode, soit dans l'amélioration d'une méthode existante pour tenir compte de l'état de l'art dans le domaine. Il est à noter que ces travaux n'avaient pas pour objectif d'effectuer une analyse critique, mais bien d'établir un bilan des connaissances relatives aux pratiques en termes d'estimation des risques. Cette étude a également montré les différences entre les prescriptions normatives et les pratiques réelles.

Par ailleurs, la détermination des valeurs à affecter aux composantes du risque pour leur estimation est sujette à la subjectivité de l'analyste. Un expert peut ainsi avoir des difficultés à se positionner sur des paramètres tels que la gravité du dommage. C'est le cas lorsque la description des niveaux n'est pas assez précise (par exemple, amputation d'un doigt à positionner parmi invalidité grave et invalidité légère) ou lorsqu'elle ne correspond pas à la situation analysée. En vue d'apporter une réponse à cette difficulté, nous avons appliqué les techniques possibilistes pour modéliser l'imperfection de la connaissance de l'expert vis-à-vis des données d'entrée intervenant dans l'estimation des risques.

LES MÉTHODES D'ESTIMATION DES RISQUES

À partir d'une veille technique en place, de recherches bibliographiques, d'opportunités suite à des interventions en usine et d'un suivi rapproché des travaux de normalisation, 275 documents ont été collectés et classés. Ils font référence de façon plus ou moins détaillée à au moins une méthode ou un outil d'appréciation de risque préconisé ou utilisé sur des machines de production industrielle. Certains documents exposent une démarche spécifique totale ou partielle d'appréciation de risque tandis que d'autres présentent plutôt des conseils ou directives qui devraient être suivies lors d'une telle démarche.

Suite à une première analyse, 108 documents contenant une méthode d'estimation des risques ont été retenus pour être codés dans une base de données relationnelle (cf. *Annexe A 1*). Pour étendre le champ des connaissances au-delà du domaine particulier de la sécurité dans l'industrie manufacturière, un certain nombre de documents issus de domaines, tels que le process ou l'équipement militaire, ont également été retenus.

SOURCES BIBLIOGRAPHIQUES

Les documents recensés et entrés dans la base de données ont des sources très diversifiées (cf. *Tableau 1*). On constate cependant que près de la moitié de ces documents sont des normes « sectorielles » ou des guides, qui représentent généralement un consensus établi entre experts d'un domaine d'application pour définir un état de l'art. Peu de documents issus d'entreprises ont été recensés. Une explication au moins peut être avancée : les entreprises ont leurs propres méthodes qu'elles ne tiennent pas à divulguer. Ceci peut certainement être aussi lié au problème d'appropriation des normes avec un choix de critères pertinents et une façon de les qualifier propres à l'entreprise.

² IRSST : Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail, Québec.

TABLEAU I

Répartition des documents codés selon le type de document d'origine

Revue	Revue scientifique	Autre (livre, etc.)	Document d'entreprise	Guide	Norme	Procédure détaillée	Logiciel
6,25 %	3,6 %	18,8 %	10,7 %	28,6 %	19,6 %	10,7 %	1,8 %

TABLEAU II

Public visé par les méthodes

Préventeurs	Concepteurs	Gestionnaires *	Consultants SST	Autres	Non précisé
13 %	34,2 %	20,4 %	2,8 %	16,7 %	34,2 %

* Les gestionnaires font généralement partie du management ou du personnel d'encadrement.

TABLEAU III

Représentation de la relation entre le risque et ses composantes

Matrice	Graphe	Opération numérique	Abaque	Combinaison	Total
53,7 %	10,2 %	14,8 %	2,8 %	18,5 %	100 %

TABLEAU IV

Composantes du risque

Gravité du dommage	Fréquence d'exposition	Durée d'exposition	Fréquence et/ou durée d'exposition	Fréquence et/ou Probabilité non spécifiée	Probabilité d'occurrence du dommage	Probabilité d'occurrence de l'événement dangereux	Possibilité d'évitement du dommage	Autres
100 %	18,5 %	5,6 %	18,5 %	29,6 %	24,1 %	30,6 %	16,7 %	19,4 %

TABLEAU V

Nombre de paramètres par méthodes et outils analysés

Nb de composantes utilisées	1	2	3	4	5
Pourcentage	1,9 %	56,5 %	17,6 %	13,9 %	10,2 %

Le *Tableau II* présente la répartition des méthodes et des outils selon le type de public visé. Le total des pourcentages est supérieur à 100 % car certaines méthodes concernent plusieurs types de destinataires. On constate qu'un tiers de ces méthodes s'adresse aux concepteurs, ce qui est à relier à la provenance des documents (normes et guides) et qui traduit le fait que l'estimation des risques doit tout d'abord être menée à la conception d'une machine. Par contre, on peut légitimement s'interroger sur le fait qu'un tiers des méthodes ne vise pas de public spécifique.

REPRÉSENTATION DE LA RELATION ENTRE LE RISQUE ET SES COMPOSANTES

La relation entre le risque et ses composantes (cf. *Annexe A 2*) est le plus souvent traduite par une représentation matricielle ou un graphe de risque. D'autres représentations telles qu'opération numérique, abaque ou encore combinaison de plusieurs de ces types ont été cependant utilisées. Le *Tableau III* donne la répartition de ces représentations.

Plus de la moitié des relations est représentée par des matrices, moyen éprouvé qui permet d'être exhaustif et d'affecter des « valeurs » à l'ensemble des combinaisons des composantes du risque. Cette exhaustivité est plus difficile à obtenir si une représentation gra-

phique est utilisée. Peu de méthodes ont recours à des opérations numériques qui, selon nous, donnent une fausse impression de quantification et de précision sur le niveau de risque alors que le choix des niveaux dans les paramètres intervenant dans le risque est peu précis car le plus souvent subjectif. Ces méthodes numériques permettent toutefois une extension plus facile de la méthode : on peut les modifier facilement afin d'ajouter de nouveaux paramètres. Un tel ajout est moins aisé dans une matrice, puisqu'il va falloir introduire des étapes intermédiaires. De fait, la représentation matricielle est adaptée à l'utilisation de deux paramètres.

La représentation sous forme de graphe ou d'abaque est visuelle. La représentation sous forme de graphe

TABLEAU VI

Nombre de niveaux pour exprimer les différentes composantes du risque

	Paramètres exprimés	Nombre de niveaux des composantes									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Gravité	107	0	4	24	46	20	8	2	0	1	2
Fréquence d'exposition	18	0	2	6	2	4	2	2	0	0	0
Durée d'exposition	4	0	1	3	0	0	0	0	0	0	0
Fréquence et durée d'exposition	18	0	6	3	3	3	0	3	0	0	0
Fréquence et durée non spécifiée	31	0	0	6	5	12	6	1	0	1	0
Probabilité d'occurrence du dommage	24	0	1	6	7	7	3	0	0	0	0
Probabilité d'occurrence d'événement dangereux	30	0	1	7	3	13	3	2	0	0	1
Possibilité d'évitement du dommage	15	0	11	1	0	2	0	0	0	0	1
Autres paramètres	27	0	6	12	2	2	1	3	0	0	1

TABLEAU VII

Répartition des méthodes et outils selon le nombre de niveaux de risque

2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Autres ou non précisé
6,5 %	29,6 %	26,8 %	19,4 %	1,8 %	2,8 %	1,8 %	2,8 %	0,0 %	0,9 %	0,9 %	6,5 %

de risque est un bon moyen de montrer visuellement et rapidement l'effet d'une mesure de prévention sur la réduction du risque, ainsi que les paramètres sur lesquels elle influe.

L'utilisation des matrices est simple car le nombre de paramètres est limité. De plus, il existe un nombre important de matrices avec différents niveaux donc il est possible de choisir un découpage fin ou grossier.

COMPOSANTES DU RISQUE

Le *Tableau IV* représente les proportions d'utilisation des différentes composantes du risque. Compte tenu de la difficulté à interpréter certaines notions normatives, les promoteurs des méthodes sont souvent amenés à choisir leur propre terminologie, pas toujours en adéquation avec les pratiques courantes. On constate, par exemple, qu'il peut être question de probabilité d'occurrence de l'événement dangereux (donc de l'origine du risque), du dommage (donc de la conséquence du risque) ou que beaucoup sont amenés à dissocier fréquence et durée, à distinguer fréquence et probabilité.

Ce constat met en évidence la difficulté qu'ont les personnes en charge des

analyses des risques (en particulier de l'estimation) à s'approprier les concepts normatifs et à s'accorder sur une terminologie commune. Ceci peut résulter d'un problème d'interprétation des notions normatives avec un choix d'une terminologie souvent inadaptée aux pratiques ou aux normes ; les concepts sont parfois difficiles à expliciter et à différencier. Heureusement, la seule composante du risque unanimement introduite dans l'ensemble des méthodes d'estimation est la gravité.

Le *Tableau V* donne le nombre de paramètres utilisés par les méthodes et outils codifiés. On constate qu'une majorité utilise deux paramètres (56,5 %). Les 4 éléments de description des composantes du risque préconisés par la norme EN ISO 14121-1 sont rarement utilisés. Les promoteurs des différentes méthodes ont donc essentiellement cherché à proposer des méthodes simples, dont on suppose qu'elles retiennent essentiellement les concepts les plus aisés à s'approprier.

ESTIMATION DES COMPOSANTES DU RISQUE

Le *Tableau VI* donne pour chaque composante du risque du *Tableau IV* le nombre de niveaux (qualitatifs ou quanti-

tatifs) envisagés pour estimer cette composante. On constate entre autres que la gravité est préférentiellement estimée sur quatre niveaux, ce nombre atteignant 10 pour deux des méthodes recensées.

Les valeurs pour les autres composantes sont généralement comprises entre 3 et 5 car en deçà de 3, le pouvoir discriminant pour exprimer l'analyse est faible, au-delà de 5, la précision est souvent illusoire. De plus, pour être homogène, un grand nombre de niveaux pour exprimer les composantes du risque doit nécessairement conduire à un grand nombre de niveaux pour estimer le risque, ce qui ne sera pas obligatoirement une aide pour l'évaluateur.

À noter qu'il n'a pas toujours été possible d'identifier ce nombre de seuils pour certains documents ou lorsque le paramètre était exprimé de façon continue (par exemple pour l'utiliser dans une opération numérique).

EXPRESSION DES NIVEAUX DE RISQUES

Le *Tableau VII* présente la répartition des méthodes en fonction du nombre de niveaux de risque proposés pour l'évaluation. Ces niveaux servent à donner des priorités aux mesures de réduction du risque.

125 termes différents sont utilisés pour décrire ces niveaux de risques. Par ailleurs, certains termes sont dépourvus de signification particulière (1, 2, 3, A, B, C, couleurs, etc.) et sont utilisés à des seules fins de classification. D'autres ont une signification liée au niveau de risque, comme « tolérable » ou « acceptable ».

IMPERFECTION DES CONNAISSANCES NÉCESSAIRES À L'ESTIMATION

Nous avons vu précédemment que l'estimation des risques demande à appréhender un certain nombre de paramètres, variables selon la méthode, pour en déduire un niveau de risque. Lorsqu'un évaluateur, réalise cette estimation, il peut hésiter, lors de la détermination de ces paramètres, notamment du fait d'une imperfection dans sa connaissance de la machine à analyser. L'estimation des différents paramètres revient le plus souvent à leur affecter une classe suite à un choix binaire. Dans le cas où la connaissance de l'expert est imparfaite, par manque d'expertise ou au début du cycle de conception de la machine, ou que la situation analysée ne correspond pas complètement aux différents niveaux utilisables pour décrire les paramètres, la personne est amenée à faire des choix qui, d'une part, ne correspondront pas forcément à la situation analysée et, d'autre part, introduiront une part de subjectivité.

Ainsi, lors de l'utilisation de la même méthode d'analyse de risque par des groupes d'experts, une grande dispersion des résultats dans l'estimation d'un niveau de risque d'une même situation de travail a été constatée. Plus précisément, dans le cas de l'estimation des risques, une personne analysant une situation de travail peut éprouver des difficultés à positionner un paramètre comme la gravité du dommage définie par des niveaux tels que « *grave atteinte permanente* » ou « *légère atteinte permanente* ». Une certaine variabilité des résultats peut être naturelle mais lorsque tous les niveaux de risque (par exemple, dans une échelle de 1 à 4) sont atteints suite à des analyses menées

par différents experts pour la même situation de travail, cela peut amener à des mesures de réduction du risque inadéquates.

Pour répondre à cette difficulté de positionnement de l'expert, nous avons appliqué les techniques possibilistes qui permettent d'avoir une gradation dans l'appartenance d'un élément à une classe et de ne plus se cantonner à un choix binaire. On peut ainsi modéliser l'imperfection des connaissances sur les différentes données et propager cette imperfection tout au long du processus calculatoire. C'est le cas quand la situation observée n'est pas décrite correctement par les définitions associées aux valeurs des niveaux pour chaque paramètre. Au lieu de fixer la valeur 1 à un seul des niveaux, l'expert pourra traduire l'imperfection de ses connaissances en affectant une valeur distincte à chacun des niveaux.

Si une donnée est décrite par 5 niveaux A, B, C, D, E, l'incertitude de la connaissance sera exprimée en affectant une valeur distincte à chacun des 5 niveaux. L'imprécision de la connaissance pourra quant à elle être traduite en affectant une valeur à plus d'un niveau (sans obligatoirement affecter une valeur à tous les niveaux).

L'INRS a développé un outil [6] utilisant un algorithme basé sur les techniques possibilistes et dont la base initiale d'estimation des risques est la méthode SUVA [7]. L'analyste utilisant l'outil dispose de curseurs qu'il pourra positionner entre deux niveaux pour une donnée d'entrée de l'estimation. L'interface logicielle de cet outil est présentée *Figure 4*.

Lorsque l'expert se place à proximité d'une valeur, par exemple « *Grave - Invalidité grave* » pour la gravité du dommage, cette valeur va se réaliser. L'imprécision de l'expert n'exclut toutefois pas que l'autre valeur de la borne, ici « *Moyen - Invalidité légère* », n'arrivera pas. Cette imprécision est traduite en affectant une valeur numérique aux deux bornes de l'intervalle (« *Grave - Invalidité grave* » et « *Moyen - Invalidité légère* ») et la propage tout au long du processus d'estimation du niveau de risque.

Cet outil permet d'estimer les paramètres d'entrée non plus sur des valeurs discrètes mais sur une échelle continue

(entre 8h/semaine et 20h/semaine, par exemple) avec la possibilité d'exprimer, au besoin, des imprécisions. Quelle que soit la combinaison des paramètres d'entrée, la sortie de l'outil affecte systématiquement la valeur 1 au niveau de risque le plus possible³, ce qui signifie qu'il est complètement possible que ce niveau de risque soit atteint. Dans l'exemple de la *Figure 4*, le risque moyen est donc le risque le plus possible. Une particularité de l'outil est de fournir, en fonction des données d'entrées, une ou plusieurs valeurs de niveaux de risque, avec des pondérations fonction de la possibilité d'atteindre ce(s) niveau(x).

L'utilisation de cet outil, dans le cadre d'une analyse de risque collégiale (cf. *Figure 5*) d'une situation de travail renforce l'interactivité entre les personnes.

L'outil apparaît comme un catalyseur pour poser des questions et faire verbaliser les personnes sur leur perception de la situation.

En phase d'estimation des risques, il permet de formaliser et de conserver une trace des choix faits par les experts. De plus, si plusieurs groupes de personnes utilisent l'outil pour une même situation de travail, les différences de cotation entre ces groupes de personnes vont pouvoir être mises en évidence et montreront leur différence de perception du risque. Ces différences de cotation pourront ensuite être utilisées comme base de discussion afin d'arriver à un consensus sur l'estimation du risque et sur le choix des mesures de prévention.

³ Au sens des techniques possibilistes.

FIGURE 4

Outil logiciel de saisie des paramètres d'entrée et de calcul du niveau de risque

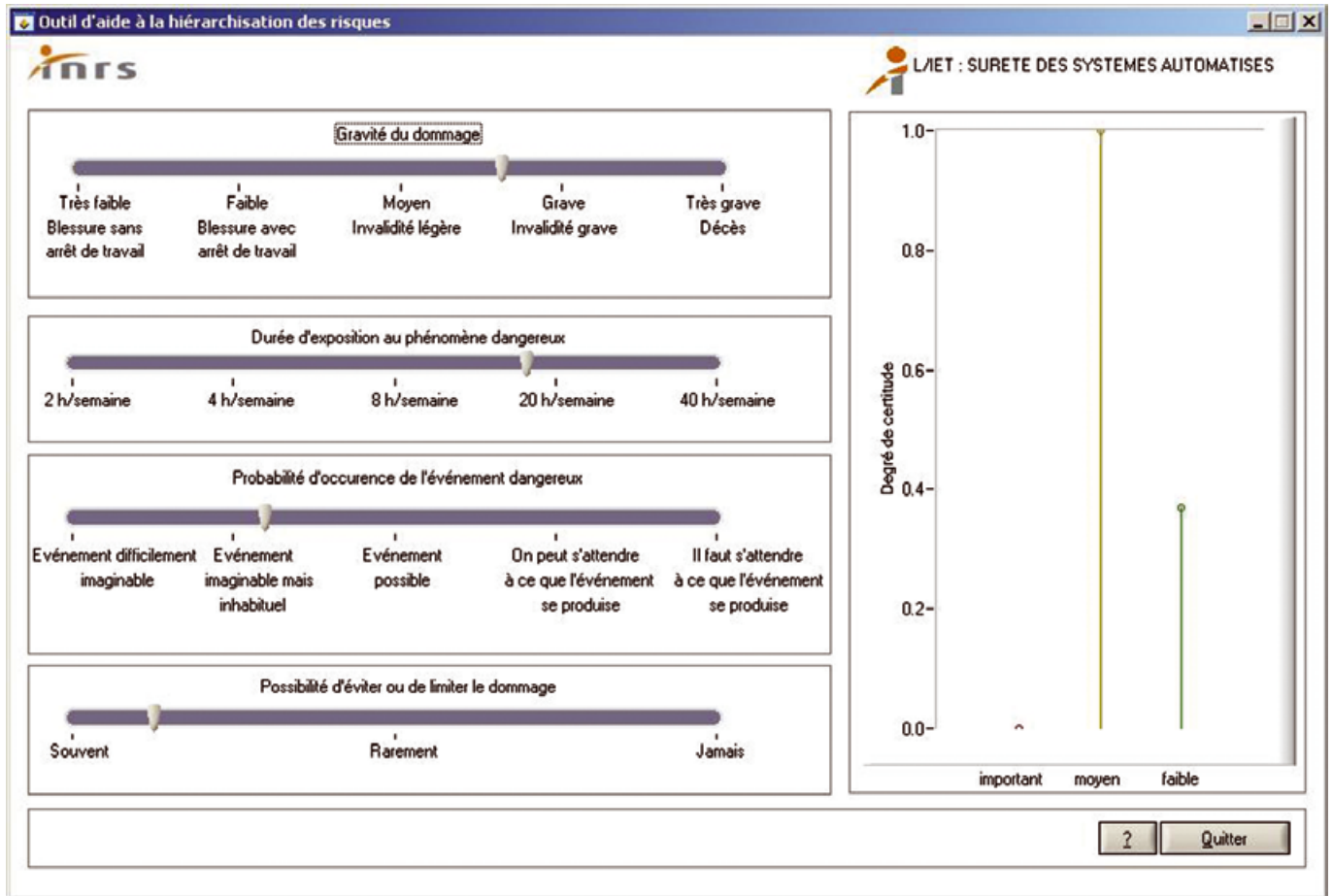


FIGURE 5

Analyse de risque collégiale



CONCLUSION

La démarche d'analyse et de réduction du risque, applicable aussi bien en phase de conception que lors de la rénovation ou de la transformation de machines, nécessite la réalisation d'une estimation des risques. Le recensement des méthodes d'estimation montre la grande diversité à tous les niveaux :

- le type de documents disponible,
- le public visé,
- les objectifs d'utilisation des méthodes,
- le type d'application,
- le nombre de paramètres utilisés,
- la définition et la description des différents niveaux pour chaque paramètre du risque...

Après analyse détaillée de chaque outil, nous constatons que le paramètre gravité est utilisé dans toutes les méthodes. Toutefois, par rapport à la norme ISO 14121, on remarque qu'un paramètre tel que la possibilité d'évitement du dommage est très peu représenté (16,7 % des méthodes). Se pose alors la question du taux de pénétration de cette norme dans l'industrie ou de la compréhension même de ce paramètre. Des paramètres tels que la probabilité d'occurrence du dommage (24 % des méthodes l'utilisent), la probabilité d'occurrence de l'événement dangereux (utilisé dans 30,5 % des méthodes) sont également très peu présents.

Ces notions étant utilisées dans la norme ISO 14121-1, il serait intéressant de comprendre pourquoi elles sont aussi peu utilisées :

- est-ce un problème de diffusion de cette norme ?
- est-ce que les composantes du risque machine sont mal comprises ? Mal exprimées ?
- y a-t-il un problème de formation ou de diffusion des connaissances ?

En ce qui concerne l'utilisation des méthodes d'estimation, les différents paramètres peuvent être difficiles à appréhender et entraîner un positionnement inadéquat de l'évaluateur, notamment suite à l'imperfection de sa connaissance vis-à-vis de la situation à analyser. L'outil d'estimation des risques développé dans cet article fournit une aide pour la démarche globale d'appré-

ciation des risques et pour réaliser l'évaluation, la hiérarchisation des phénomènes dangereux et la définition de la stratégie à adopter pour réduire les risques d'une machine. Comme dans toute estimation des risques, l'outil ne doit pas être considéré comme un moyen de donner une valeur absolue pour une situation donnée. Par contre, il fournira une information sur la possibilité d'atteindre les niveaux de risque pour différents phénomènes dangereux et aidera donc à l'évaluation des risques et des mesures de prévention à mettre en œuvre pour les réduire. Il montre une tendance dans la variation du niveau de risque et offre une gradualité pour sa représentation (la transition entre deux niveaux de risque est plus progressive).

Reçu le : 17/10/2008

Accepté le : 30/01/2009

POINTS À RETENIR

- Il y a une grande diversité dans les méthodes et leur description : adaptation des méthodes en fonction de l'entreprise, du domaine d'activité.
- Les résultats d'une estimation des risques sont variables en fonction des personnes réalisant cette estimation.
- La détermination de la valeur d'un paramètre entraîne une subjectivité dans l'estimation du niveau de risque.
- La modélisation de l'imperfection est utile pour la hiérarchisation des phénomènes dangereux et le choix des mesures de réduction du risque.

@nnexe : retrouvez l'annexe dans la version électronique (PDF) de cet article sur notre site www.hst.fr

BIBLIOGRAPHIE

[1] Directive 98/37/CE du 22 juin 1998 concernant le rapprochement des législations des états membres relatives aux machines. Journal officiel des communautés européennes, n° L.207 du 23 juillet 1998, 46 p.

[2] EN ISO 14121-1 « Sécurité des machines - Appréciation du risque - Partie 1 : principes », 2007, 40 p.

[3] Caisse régionale d'assurance maladie d'Ile-de-France - Sécurité des équipements de travail, guide pour l'analyse des risques et le choix des mesures de prévention, DTE 127, 2002.

[4] PÂQUES J.J., LOPEZ A., LAMY P., GAUTHIER F., CHARPENTIER P., DAVID R. - *Reasoned review of the tools for assessing the risks associated with industrial machines: preliminary results*, Proceeding of the 4th Safety of Industrial Automated Systems, September 26-28 2005, Chicago, USA, 10 p.

[5] LAMY P., LEVRAT E., PÂQUES J.J. - *Méthodes d'estimation des risques machine : analyse bibliographique*, 15^e congrès λμ, Maîtrise des risques et sûreté de fonctionnement, 10-12 octobre 2006, Lille.

[6] LAMY P., CHARPENTIER P. - *How can we account for risk estimation data inaccuracy*, Proceeding of the 5th Safety of Industrial Automated Systems, November 12-13 2007, Tokyo, Japan, 7 p.

[7] Méthode Suva d'appréciation des risques à des postes de travail et lors de processus de travail. Caisse nationale suisse d'assurance en cas d'accidents. Octobre 2001, 47 p.

@nnexe

A1 : MÉTHODOLOGIE DE RECENSEMENT DES MÉTHODES D'ESTIMATION

Deux fichiers ont été créés pour coder les informations (principalement descriptives et purement factuelles) caractérisant :

■ les documents. Un formulaire permettait de coder :

- la désignation originale (titre, auteurs, année, éditeur, etc.),
- le type de document (norme, guide technique, article, procédure interne de compagnie, etc.),
- l'origine (compagnie, organisme de prévention, fabricant, etc.).

■ les méthodes ou outils décrits dans ces documents. Plusieurs formulaires ont été établis pour coder :

- le type d'outil de détermination du risque (matrice, graphe de risque, opération numérique, abaque, combinaison de plusieurs types),
- les paramètres utilisés (gravité, fréquence ou durée d'exposition, probabilité d'occurrence du dommage ou de l'événement dangereux, possibilité d'évitement du dommage, autres),
- la pondération des paramètres (appellation, terme exact, qualificatif, seuil de changement, description),
- les éléments de caractérisation du risque (nom du niveau de risque, valeur, descriptif, action à prendre),
- le type d'application (général, grand public, procédé industriel continu ou discontinu, tout type de machines, machine particulière, équipement militaire, etc.).

■ l'usage de la méthode ou de l'outil (détermination des limites, identification des phénomènes dangereux, estimation ou évaluation ou réduction des risques, détermination de priorités d'intervention, etc.),

■ la phase concernée du cycle de vie de la machine (conception, installation, mise en marche, ajustement, réparation, maintenance préventive, déblocage, etc.).

Pour assurer la qualité scientifique de la codification et la rigueur de l'identification des méthodes, une double codification indépendante a été réalisée par l'INRS et l'UQTR⁵. À l'issue de cette double codification, une confrontation

FIGURE A 1

Exemple de matrice de risque

A	Fréquente	3	2	1	1	1
B	Occasionnelle	3	2	1	1	1
C	Rare	3	2	2	1	1
D	Improbable	3	2	2	2	1
E	Presque impossible	3	3	3	2	2
Probabilité d'occurrence ↑		V	IV	III	II	I
Gravité →		Blessure réversible Sans arrêt	Blessure réversible Avec arrêt	Blessure irréversible Légère atteinte permanente	Blessure irréversible Grave atteinte permanente	Décès

systématique a mis en évidence des divergences qui ont été résolues lors d'échanges et de sessions de confrontation. Le taux de divergences a ainsi été réduit de 36 % (avant confrontation à distance) à 12 % (avant confrontation finale) pour atteindre un consensus final de tous les partenaires sur la base de données.

Compte tenu de la constitution de la base, l'exploitation de son contenu conduit naturellement à des constats relatifs d'une part, aux documents répertoriés et d'autre part, aux méthodes décrites dans ces documents.

A2 : REPRÉSENTATION DE LA RELATION ENTRE LE RISQUE ET SES COMPOSANTES

La représentation matricielle

Un exemple de matrice est donné *Figure A 1*.

Une matrice de risque est une table dont la forme la plus courante est bidimensionnelle, ce qui permet de combiner toutes les classes de toutes les entrées (une entrée correspond par exemple à la « gravité du dommage » et la seconde à la « probabilité d'occurrence de ce dommage »).

L'utilisation d'une telle méthode est simple. Pour chaque situation dangereuse identifiée, une catégorie est affectée à chaque critère d'entrée. Le

niveau de risque de la situation dangereuse analysée est obtenu par projection des catégories des entrées sur le référentiel de risque (ici la matrice). Par exemple, pour une gravité estimée à IV (« Blessure réversible avec arrêt ») et une probabilité d'occurrence estimée à C (« Rare »), l'intersection des deux critères donne un niveau de risque de 2 sur une échelle à 3 niveaux.

La représentation graphique

Une autre représentation utilisée est le graphe (*cf. Figure A 2*). Un graphe de risque a une structure d'arbre de décision que l'on lit de gauche à droite. Chaque nœud de l'arbre représente une composante du risque. Chaque composante a au moins deux classes, et chaque classe est représentée par une ramification du nœud.

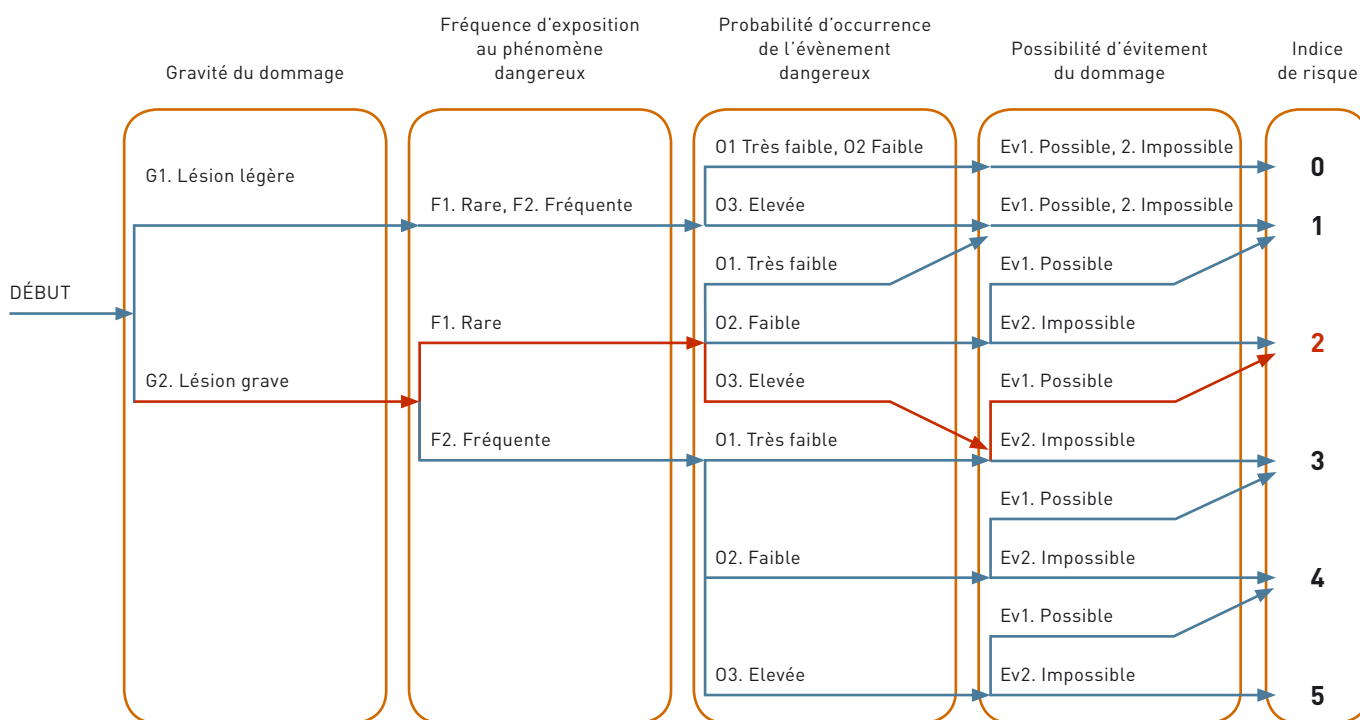
Pour chaque situation dangereuse, on alloue une classe à chaque critère d'entrée. Un chemin est alors tracé en fonction des classes des différents critères d'entrée. La ramification finale donne un niveau de risque en accord avec le chemin suivi.

Les graphes de risque sont de bons moyens pour montrer visuellement et rapidement l'effet d'une mesure de pro-

⁵ Département de Génie industriel, Université du Québec à Trois-Rivières, CP 500, Trois-Rivières, QC, Canada, G9A 5H7.

FIGURE A 2

Exemple de graphe de risque



tection sur la réduction du risque étudié et sur quelle composante cette mesure a une influence Cette représentation devient fastidieuse si le nombre de branches augmente.

En général, un graphe de risque peut aussi être transposé sous forme d'une matrice multidimensionnelle. Par exemple, dans le cas présenté en Figure A 2, nous pouvons transformer le graphe de risque en matrice à l'aide de la correspondance suivante : Gravité « 1, 2 » pour gravité du dommage « Lésion légère, lésion grave » ; F1, F2 pour fréquence d'exposition au phénomène dangereux rare, légère ; occurrence 1, 2, 3 pour probabilité d'occurrence très faible, faible, élevée ; EV1, EV2 pour possibilité d'évitement possible, impossible. On obtient la représentation du Tableau A 1.

REMARQUE

Il se peut que certaines combinaisons ne soient pas décrites dans le graphe d'origine. Dans ce cas, des cases correspondantes du tableau ne seront pas renseignées.

TABEAU A 1

Exemple de transposition d'un graphe de risque

		Occurrence 1		Occurrence 2		Occurrence 3	
		Ev 1	Ev 2	Ev 1	Ev 2	Ev 1	Ev 2
Gravité 1	F1	0	0	0	0	1	1
	F2	0	0	0	0	1	1
Gravité 2	F1	1	1	1	2	2	3
	F2	2	3	3	4	4	5

La représentation numérique

Ce type de méthode affecte des valeurs numériques aux différentes composantes du risque. Le fonctionnement reste sensiblement identique aux méthodes précédentes : une valeur (ou poids) est choisie pour chacune des composantes et le risque est estimé suite à une combinaison (addition et/ou multiplication) de ces valeurs.

Une des limitations de ce type de méthode vient de l'utilisation de valeurs numériques qui peuvent donner une impression de quantification

précise du niveau de risque obtenu alors que le choix de ces valeurs reste le plus souvent subjectif. De plus, dans le processus calculatoire menant au résultat final de l'estimation des risques, lors de l'utilisation de méthodes numériques, il faudra être attentif à utiliser des échelles de même type (au moins intervalle) pour les paramètres d'entrées sinon la validité des conclusions peut être remise en question. L'utilisation de catégories symboliques pour représenter les paramètres pourra ainsi attirer notre attention.

ENCADRÉ

Dans les échelles de mesure utilisées pour les composantes du risque, certaines méthodes mélangent des notions distinctes. On peut classer les représentations des grandeurs en deux types :

- ▣ qualitative lorsque la grandeur n'est pas mesurable. Ce type de référentiel utilise des grandeurs discrètes et représente les différents niveaux du paramètre par une catégorie symbolique (lettres, nombre, mots) ; par exemple, la gravité du dommage décrite avec les niveaux « décès, grave atteinte permanente, légère atteinte permanente, blessure réversible avec arrêt, blessure irréversible sans arrêt ».

- ▣ quantitative lorsque la grandeur est mesurable. Dans ce cas, il est naturel d'utiliser un référentiel numérique pour représenter les différentes valeurs atteignables par le paramètre, en veillant à l'échelle de mesure, qui devra être au minimum une échelle d'intervalles (intervalles constants entre les valeurs). Nous pouvons alors avoir des référentiels numériques discrets ou continus et effectuer des opérations mathématiques sur ces valeurs.

La théorie du mesurage [1] met en avant certaines propriétés auxquelles il faudra être attentif. Par exemple, une échelle ordinale ne tolère pas de transformation autre qu'une comparaison entre deux valeurs. Il n'est donc pas possible d'effectuer une opération numérique du type addition, multiplication pour obtenir le niveau de risque à partir des résultats de l'estimation des composantes du risque.

Dans la plupart des cas, les paramètres sont exprimés de façon symbolique discrète. Par exemple, pour la durée d'exposition au phénomène dangereux représentée par « 2h/semaine, 4h/semaine, 8h/semaine, 20h/semaine, 40h/semaine », c'est une représentation sous forme de catégories symboliques discrètes et donc une échelle ordinale, et non une représentation numérique sous forme d'échelle d'intervalles puisque les intervalles entre les différentes valeurs sont non constants. De même, la gravité du dommage est une grandeur qualitative évaluée sur des échelles discrètes et le plus souvent symboliques. L'évaluateur ne pourra donc pas mesurer cette donnée et il devra donc l'évaluer subjectivement. Afin d'éviter une confusion avec un référentiel numérique, il vaudra mieux utiliser une représentation symbolique des niveaux du paramètre sous forme de lettre plutôt que de chiffre (par exemple, gravité variant de A à E plutôt que de 1 à 5).

Dans le cas où le risque est décrit comme une grandeur qualitative ordonnée, il ne faut pas vouloir mesurer l'écart entre deux situations de risque ni chercher à exprimer une situation de risque comme n fois plus forte qu'une autre. Le niveau de risque va servir à hiérarchiser les situations mais ne devra pas être utilisé au sens d'une échelle absolue comme lorsque l'on compare 2 sources chaudes par leurs température.

Un exemple de méthode est donné par l'AISS [2]. Le risque résultant est obtenu en utilisant une expression analytique du type :

$$R = M \times E - (M/30) \times P$$

avec

- $M = Gr \times Ex \times Pr \times Ev$
- $E = Ea + Eb + Ec$
- $P = Q + Phi + O$

Les paramètres intervenant dans ces équations sont définis par :

- Gr = Gravité,
- Ex = Fréquence et durée d'exposition,
- Pr = Probabilité d'un événement dangereux,
- Ev = Possibilité d'éviter ou de limiter le dommage,
- Ea = Implantation du poste,
- Eb = Ambiances de travail,
- Ec = Contraintes diverses,

- Q = Qualification du personnel,
- Phi = Facteurs physiques et psychiques,
- O = Organisation du travail.

La représentation par « combinaison »

La quatrième représentation utilisée est une représentation appelée combinaison. Ce sont des méthodes qui combinent plusieurs approches (de celles présentées ci-dessus). On peut ainsi avoir, par exemple, la détermination des composantes du risque sous forme numérique puis la détermination du niveau de risque à l'aide d'une matrice.

La représentation par abaque

La dernière représentation rencontrée est celle utilisant des abaques (Exemple *Figure A 3*).

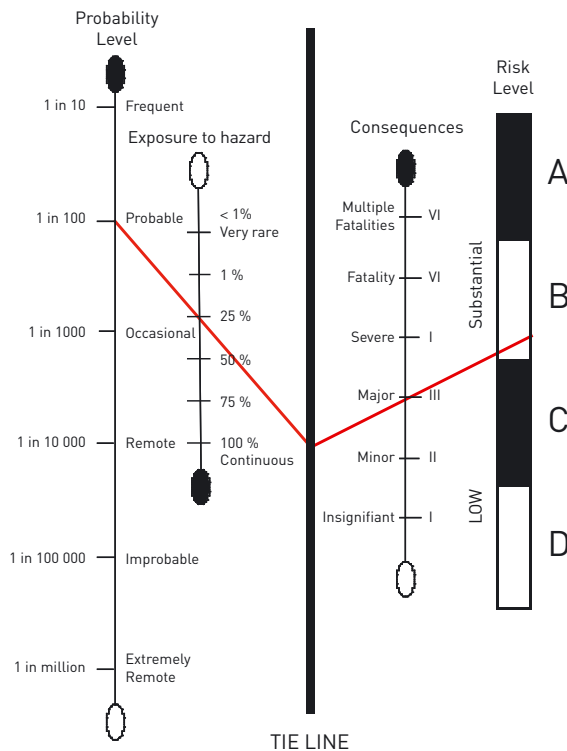
L'utilisation de cet abaque se fait en tirant une ligne entre le niveau de probabilité représentatif de la situation analysée et l'exposition au danger. Cette ligne est prolongée jusqu'à la ligne centrale (tie line). À partir de ce point, le niveau de risque est obtenu en traçant une ligne passant par la conséquence estimée pour la situation de travail analysée.

Les abaques permettent une représentation visuelle du processus menant à l'estimation du niveau de risque et de ce fait, peuvent être plus facilement utilisables par certaines personnes (en fonction de leurs habitudes et de leur perception de l'outil).

Ces abaques n'ont pas été répertoriés en nombre important dans les références bibliographiques que nous avons analysées.

FIGURE A 3

Exemple d'abaque : le calculateur de risque de Raafat [3]



A3 : QUELQUES ÉLÉMENTS SUR LA LOGIQUE FLOUE ET LES TECHNIQUES POSSIBILISTES APPLIQUÉES À LA PRISE EN COMPTE DE L'IMPRÉCISION ET DE L'INCERTITUDE

Une distribution de possibilités est basée sur la notion d'ensemble flou proposée par Zadeh [4]. Un ensemble flou \bar{A} est défini par une fonction d'appartenance qui associe à chaque élément x du support un degré $\mu_{\bar{A}}(x)$ compris entre 0 et 1. Ce degré d'appartenance peut ensuite être interprété de différentes manières suivant l'utilisation que l'on souhaite en faire. Une de ces interprétations concerne la notion d'incertitude pour laquelle l'ensemble flou représente une distribution de possibilités.

Une distribution de possibilités est définie par un sous ensemble flou de fonction d'appartenance $\mu_{\bar{A}}$ et satisfaisant une condition de normalisation :

$$\sup_x(\mu_{\bar{A}}(x)) = 1$$

$\mu_{\bar{A}}$ représente le degré de possibilité qu'une variable X prenne la valeur x sachant uniquement que " X est \bar{A} ". Les valeurs du support de \bar{A} , $\{x/\mu_{\bar{A}}(x) \neq 0\}$, sont alors mutuellement exclusives, *i.e.* la variable X ne peut prendre qu'une valeur unique comme en probabilités. Le degré de possibilité ordonne les valeurs en termes de plausibilité. Ces distributions de possibilités (Figure A 5) permettent de traduire d'une part l'imprécision et d'autre part l'incertitude.

Suivant la connaissance que l'on a d'une situation, la mesure peut être représentée de diverses manières. Nous détaillons ici les différentes représentations possibles de la cotation d'une situation par un expert.

Dans le cas précis, il n'y a aucune indétermination, la cotation sera précise (cas classique, *cf.* Figure A 4).

S'il y a une indétermination sur la valeur estimée mais pas sur sa réa-

lisation, cette dernière sera **imprécise** (*cf.* Figure A 5). L'expert traduit ici le fait que la situation observée n'est pas décrite correctement par les définitions associées aux labels de l'échelle. Plusieurs niveaux peuvent correspondre plus ou moins à son évaluation. L'expert traduit cette situation sous la forme d'un nombre flou triangulaire sur l'échelle considérée en affectant des valeurs différentes de 0 aux valeurs de l'échelle selon leur possibilité de correspondre au niveau de l'attribut estimé. La lecture de cette estimation sera de la forme « environ X » ou « plutôt X ». On s'assurera qu'au moins une catégorie corresponde à la situation afin de respecter la définition d'une distribution de possibilité, *i.e.* satisfaisant la condition de normalisation.

S'il y a une **incertitude** sur la valeur que doit prendre l'attribut, on ajoute un niveau d'incertitude à l'ensemble du référentiel. Plus ce niveau est élevé, plus l'incertitude qu'il traduit est importante (*cf.* Figure A 5).

Ce type de distribution permet également de traduire l'ignorance totale sans utiliser une modalité particulière. Par exemple, la *figure A 6* montre l'ignorance dans le cas classique et avec une distribution de possibilité. Dans le cas classique, si l'expert ne sait rien sur la situation, il aura tendance, par « principe de précaution », à affecter la catégorie la plus critique à 1 et à mettre toutes les autres à 0 (si aucune classe n'est activée, la sortie du processus calculatoire est nulle). Dans le cas possibiliste, l'ignorance se traduit par une distribution uniforme à 1 sur l'ensemble du référentiel : aucun élément de connaissance ne permet de réduire la possibilité d'une partie du référentiel. Ainsi le processus calculatoire tient compte de tous les qualificatifs pour cet attribut.

FIGURE A 4

Exemple de cotation classique

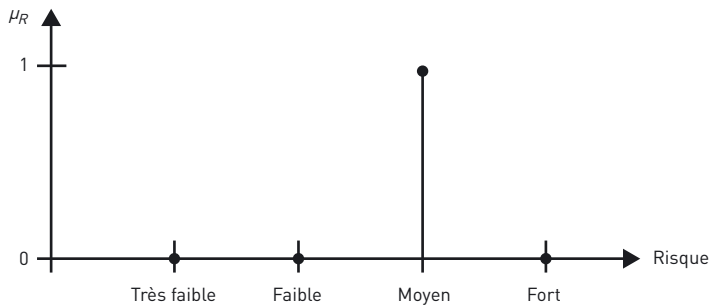


FIGURE A 5

Exemples de distributions traduisant l'imprécision (figure de gauche) et l'incertitude (figure de droite)

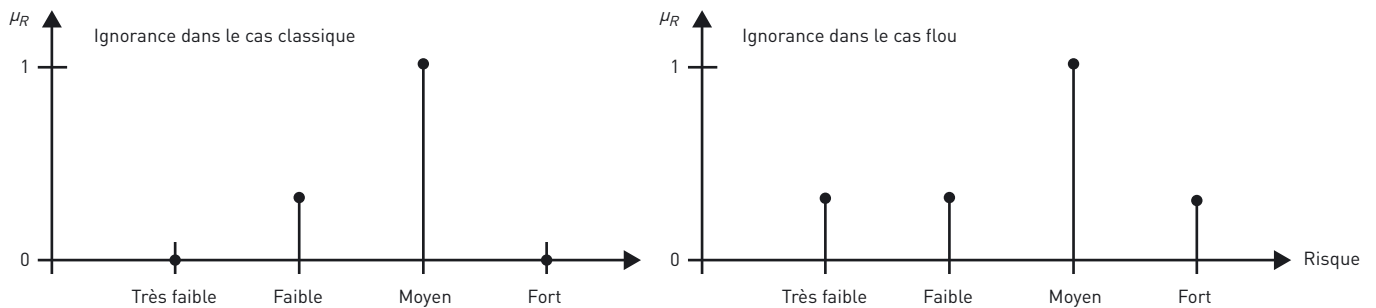
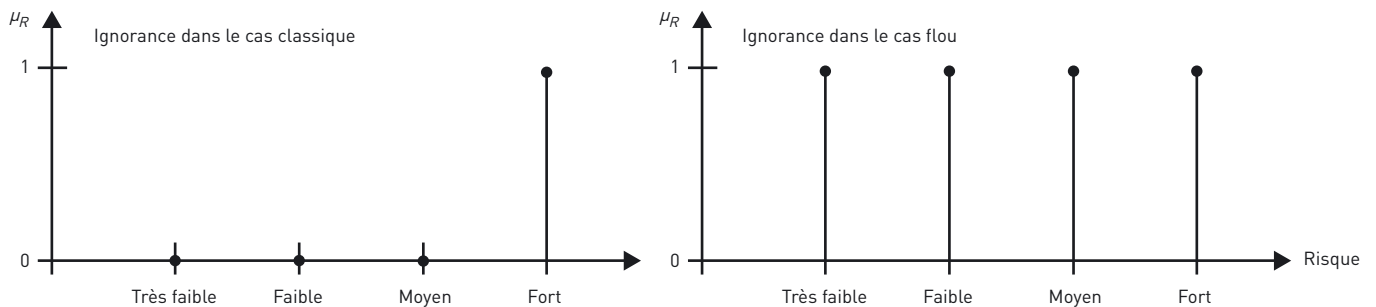


FIGURE A 6

Expression de l'ignorance dans le cas classique et avec une distribution de possibilité



BIBLIOGRAPHIE

[1] P. SUPPES., J.L. ZINNES – Basic measurement theory, in R. DUCAN LUCE, R.R. BUSK, E. GALENTER, Handbook of Mathematical psychology, Vol.1, New York: John Wiley and Sons, 1963.

[2] Association Internationale de Sécurité Sociale - Calculez vous-même vos risques d'accident ! - Appréciation du risque mécanique au poste de travail., 1998, ISBN 92-843-2130-1.

[3] N. WORSELL, J. WILDAY – The application of risk assessment to machinery safety - Review of risk ranking and risk estimation techniques, Health and Safety Laboratory, 2001, 130 p.

[4] L. A. ZADEH – Fuzzy Sets, *Information and control*, 8, 1965, 338-353.