

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN GÉNIE INDUSTRIEL

PAR
JOSÉ ANGEL CARDENAS GONZALEZ

ÉTUDE DE LA DÉFINITION DES PARAMETRES DE PROBABILITÉ
UTILISÉS DANS LES OUTILS D'ESTIMATION DU RISQUE EN SÉCURITÉ
DES MACHINES

SEPTEMBRE 2016

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire ou de cette thèse a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire ou de sa thèse.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire ou cette thèse. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire ou de cette thèse requiert son autorisation.

REMERCIEMENTS

Je remercie Dieu, notre créateur, de m'avoir donné tout pour réaliser cette étude, merci pour toutes les bénédictions qu'il me donne chaque jour.

Je remercie monsieur François Gauthier, mon directeur de recherche, de m'avoir confié cette étude et pour sa constante collaboration dans le développement de cette recherche.

Je remercie mon ami Paul-André, pour son aide inconditionnelle dans la révision du français.

Je remercie mon épouse Ingrid Johanna et mes enfants Santiago y Sara pour leur grand amour.

Je remercie toutes les personnes qui ont participé dans cette recherche.

SOMMAIRE

L'estimation du risque est une étape préconisée dans les normes de sécurité des machines lors du processus d'appréciation du risque. L'appréciation des risques en sécurité des machines est utilisée afin notamment de réduire les risques de manière appropriée. Traditionnellement, l'estimation du risque fait appel à des paramètres de probabilité qualitatifs (probabilité d'occurrence du dommage et probabilité de l'événement dangereux) qui posent souvent problème aux personnes qui effectuent l'estimation.

Des études antérieures ont permis de recueillir des données sur un grand nombre d'outils d'estimation du risque en sécurité de machines. Ces études ont aussi permis de démontrer que la manière de définir les paramètres de probabilité pouvaient grandement influencer les utilisateurs des outils d'estimation du risque. À l'heure actuelle, les impacts que peuvent avoir les manières de définir les paramètres de probabilité dans l'estimation du risque en sécurité des machines sont peu connus.

La présente recherche s'est orientée vers l'étude de la définition des paramètres de probabilité utilisés dans l'estimation du risque en sécurité des machines. L'objectif était d'évaluer les impacts que peut avoir la manière dont sont définis les paramètres de probabilité sur leur évaluation.

Dix manières de définir le paramètre de probabilité d'occurrence du dommage ont été élaborées selon le type d'échelle, le nombre des niveaux et la façon de définir chaque niveau. Une étude expérimentale a ensuite été réalisée. Un outil d'expérimentation a été utilisé pour colliger les informations en ce qui concerne la variabilité de l'estimation de la probabilité et la facilité à choisir un niveau de l'échelle du paramètre de probabilité. L'outil comprend 4 scénarios accidentels pour lesquels il était demandé d'estimer la probabilité du dommage. L'outil d'expérimentation a été appliqué par 37 ingénieurs diplômés venant de différents domaines.

Les résultats de cette recherche montrent qu'il y a des différences dans l'estimation du risque en sécurité de machines, lorsque le paramètre de probabilité du dommage est défini différemment. La variance de l'estimation de la probabilité du dommage et la difficulté du choix du niveau dans l'échelle peuvent diminuer quand les niveaux du paramètre de probabilité sont définis en utilisant une structure qualitative détaillée. Par contre, quand les niveaux du paramètre de probabilité sont définis en utilisant des chiffres et exposants, cela

peut augmenter la variance de l'estimation de la probabilité et la difficulté du choix du niveau dans l'échelle.

La variance de l'estimation de la probabilité peut augmenter à mesure que le nombre de niveaux augmente dans la définition du paramètre de probabilité du dommage. Il est aussi possible de conclure que l'écart entre les niveaux de l'échelle d'un paramètre de probabilité peut influencer la variance des résultats obtenus.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	i
SOMMAIRE.....	ii
TABLE DES MATIÈRES.....	iv
LISTE DES FIGURES.....	vii
LISTE DES TABLEAUX.....	ix
1 INTRODUCTION	1
2 PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS DE RECHERCHE.....	5
2.1 PROBLÉMATIQUE DE LA RECHERCHE	5
2.2 OBJECTIFS.....	5
3 REVUE DE LA LITTÉRATURE.....	7
3.1 LA MESURE	7
3.2 THÉORIE DE LA MESURE	7
3.3 LES ÉCHELLES DE MESURE	8
3.3.1 <i>Les échelles de base</i>	9
3.3.2 <i>Les échelles d'attitudes</i>	14
3.4 MESURE DE LA PROBABILITÉ DANS L'ESTIMATION DU RISQUE EN SÉCURITÉ DES MACHINES	23
3.4.1 <i>Estimation qualitative de la probabilité</i>	23
4 MÉTHODOLOGIE DE RECHERCHE	27
4.1 DÉTERMINATION DES MANIÈRES DE DÉFINIR LES PARAMÈTRES DE PROBABILITÉ	27
4.1.1 <i>Identification des échelles de base</i>	28
4.1.2 <i>Identification des échelles d'attitude</i>	31
4.2 ÉLABORATION DES ALTERNATIVES	33
4.2.1 <i>Alternatives A et B</i>	34
4.2.2 <i>Alternatives C et D</i>	34
4.2.3 <i>Alternatives E et F</i>	35
4.2.4 <i>Alternative G</i>	35
4.2.5 <i>Alternative H</i>	36

4.2.6	<i>Alternative I</i>	36
4.2.7	<i>Alternative J</i>	36
4.3	ÉTUDE EXPÉRIMENTALE	37
4.3.1	<i>Élaboration des scénarios accidentels</i>	37
4.3.2	<i>Établissement du niveau de probabilité de référence</i>	38
4.3.3	<i>Élaboration et validation de l'outil d'expérimentation</i>	39
4.3.4	<i>Application de l'outil d'expérimentation</i>	40
4.3.5	<i>Analyse de résultats</i>	41
5	RÉSULTATS	43
5.1	IDENTIFICATION DES TYPES D'ÉCHELLES UTILISÉS DANS LES PARAMÈTRES DE PROBABILITÉ	43
5.1.1	<i>Paramètre de probabilité d'occurrence du dommage</i>	43
5.1.2	<i>Paramètre de probabilité d'occurrence d'un événement dangereux</i>	46
5.2	IDENTIFICATION DES STRUCTURES	49
5.2.1	<i>Paramètres de probabilité d'occurrence du dommage</i>	49
5.2.2	<i>Paramètre de probabilité d'occurrence d'un événement dangereux</i>	49
5.3	ALTERNATIVES ÉLABORÉES	50
5.4	PROBABILITÉS DE RÉFÉRENCE	51
5.5	ANALYSE DES RÉSULTATS DE L'EXPÉRIMENTATION PAR ALTERNATIVE	53
5.5.1	<i>Alternative A</i>	54
5.5.2	<i>Alternative B</i>	56
5.5.3	<i>Alternative C</i>	58
5.5.4	<i>Alternative D</i>	60
5.5.5	<i>Alternative E</i>	63
5.5.6	<i>Alternative F</i>	65
5.5.7	<i>Alternative G</i>	67
5.5.8	<i>Alternative H</i>	70
5.5.9	<i>Alternative I</i>	72
5.5.10	<i>Alternative J</i>	75
5.6	ANALYSE GLOBALE DES RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX	77
5.6.1	<i>Alternatives à 3 niveaux</i>	79
5.6.2	<i>Alternatives à 5 niveaux</i>	80
5.6.3	<i>Analyse comparative des alternatives</i>	82

6 DISCUSSION ET CONCLUSION	86
6.1.1 <i>Alternatives à 3 niveaux</i>	86
6.1.2 <i>Alternatives à 5 niveaux</i>	87
BIBLIOGRAPHIE.....	89
ANNEXES.....	93
Annexe 1 : Outils d'estimation du risque en sécurité des machines.....	93
Annexe 2 : Scénarios	95
Annexe 3 : Documents utilisés pour établir les probabilités de référence	100
Annexe 4 : Aperçu de l'outil de l'expérimentation	107
Annexe 5 : Documents utilisés pour l'expérimentation.....	113

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Processus itératif pour réduire le risque (ISO 12100, 2010).....	2
Figure 2 : Échelle visuelle analogue	22
Figure 3 : Alternative A - Scénario 1.....	55
Figure 4 : Alternative A - Scénario 2	55
Figure 5 : Alternative A - Scénario 3.....	55
Figure 6 : Alternative A - Scénario 4	55
Figure 7 : Facilité à choisir un niveau de l'échelle - Alternative A.....	55
Figure 8 : Alternative B - Scénario 1.....	57
Figure 9 : Alternative B - Scénario 2	57
Figure 10 : Alternative B - Scénario 3.....	57
Figure 11 : Alternative B - Scénario 4	57
Figure 12 : Facilité à choisir un niveau de l'échelle - Alternative B.....	57
Figure 13 : Alternative C - Scénario 1.....	59
Figure 14 : Alternative C - Scénario 2	59
Figure 15 : Alternative C - Scénario 3.....	59
Figure 16 : Alternative C - Scénario 4	59
Figure 17 : Facilité à choisir un niveau de l'échelle - Alternative C.....	60
Figure 18 : Alternative D - Scénario 1.....	61
Figure 19 : Alternative D - Scénario 2	61
Figure 20 : Alternative D - Scénario 3.....	62
Figure 21 : Alternative D - Scénario 4	62
Figure 22 : Facilité à choisir un niveau de l'échelle - Alternative D.....	62
Figure 23 : Alternative E – Scénario 1.....	64
Figure 24 : Alternative E - Scénario 2	64
Figure 25 : Alternative E - Scénario 3.....	64
Figure 26 : Alternative E - Scénario 4	64
Figure 27 : Facilité à choisir un niveau de l'échelle - Alternative E.....	64
Figure 28 : Alternative F - Scénario 1.....	66
Figure 29 : Alternative F - Scénario 2	66
Figure 30 : Alternative F - Scénario 3.....	66
Figure 31 : Alternative F - Scénario 4	66
Figure 32 : Facilité à choisir un niveau de l'échelle - Alternative F	67
Figure 33 : Alternative G – Scénario 1.....	68

Figure 34 : Alternative G - Scénario 2.....	68
Figure 35 : Alternative G - Scénario 3.....	68
Figure 36 : Alternative G - Scénario 4.....	68
Figure 37 : Facilité à choisir un niveau de l'échelle - Alternative G.....	69
Figure 38 : Alternative H - Scénario 1.....	71
Figure 39 : Alternative H - Scénario 2.....	71
Figure 40 : Alternative H - Scénario 3.....	71
Figure 41 : Alternative H - Scénario 4.....	71
Figure 42 : Facilité à choisir un niveau de l'échelle - Alternative H.....	71
Figure 43 : Alternative I – Scénario 1.....	73
Figure 44 : Alternative I - Scénario 2.....	73
Figure 45 : Alternative I - Scénario 3.....	73
Figure 46 : Alternative I - Scénario 4.....	73
Figure 47 : Facilité à choisir un niveau de l'échelle - Alternative I.....	74
Figure 48 : Alternative J - Scénario 1.....	76
Figure 49 : Alternative J - Scénario 2.....	76
Figure 50 : Alternative J - Scénario 3.....	76
Figure 51 : Alternative J - Scénario 4.....	76
Figure 52 : Facilité à choisir un niveau de l'échelle - Alternative J.....	76

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Éléments du risque (ISO 12100, 2010)	3
Tableau 2 : Échelle nominale (source des images: Google.ca).....	9
Tableau 3 : Echelle ordinale (source des images: Google.ca)	10
Tableau 4 : Échelle d'intervalle (source des images: Google.ca)	12
Tableau 5 : Échelle de rapport (source des images: Google.ca).....	13
Tableau 6 : Résumé des échelles de mesure (source des images: Google.ca)	14
Tableau 7 : Exemple d'une échelle de Thurstone utilisée pour mesurer l'attitude face au divorce (Alexandre, 1971).....	16
Tableau 8 : Exemple d'une échelle Likert (Alexandre, 1971)	18
Tableau 9 : Échelle de Guttman.....	19
Tableau 10 : Exemple d'échelle sémantique différentielle.....	21
Tableau 11 : Critères pour déterminer les façons de définir les paramètres de probabilité dans les outils d'estimation du risque en sécurité des machines	28
Tableau 12 : Caractéristiques pour la classification des outils selon les échelles de base	30
Tableau 13 : Caractéristiques pour la classification des outils selon les échelles d'attitude ..	32
Tableau 14 : Alternatives pour définir le paramètre de probabilité du dommage	37
Tableau 15 : Échelles de base identifiées – paramètre de probabilité d'occurrence du dommage	43
Tableau 16 : Outils 1, 7, 33, 94.....	44
Tableau 17 : Outils 3, 6, 24, 34, 35, 41, 45, 46, 48, 58, 66, 89, 102 et 114	45
Tableau 18 : Outils 10, 44, 85.....	46
Tableau 19 : Échelles de base identifiées – paramètre de probabilité d'occurrence d'un événement dangereux	47
Tableau 20 : Outils 53, 57	47
Tableau 21 : Outils 19, 62, 67, 69 et 91	48
Tableau 22 : Outil 17	48
Tableau 23 : Types de structures du paramètre de probabilité d'occurrence du dommage...	49
Tableau 24 : Types de structure du paramètre de probabilité d'occurrence d'un événement dangereux	50
Tableau 25 : Types de structures du paramètre de probabilité	50
Tableau 26 : Alternatives pour définir le paramètre de probabilité d'occurrence du dommage	51
Tableau 27 : Résultats de l'estimation des experts	52

Tableau 28 : Résultats de la probabilité de référence pour 3 niveaux	52
Tableau 29 : Résultats de la probabilité de référence pour 5 niveaux	53
Tableau 30 : Résumé des probabilités de référence	53
Tableau 31 : Statistiques de l'estimation de la probabilité - Alternative A.....	54
Tableau 32 : Statistiques de l'estimation de la probabilité - Alternative B.....	56
Tableau 33 : Statistiques de l'estimation de la probabilité - Alternative C.....	59
Tableau 34 : Statistiques de l'estimation de la probabilité - Alternative D.....	61
Tableau 35 : Statistiques de l'estimation de la probabilité - Alternative E.....	63
Tableau 36 : Statistiques de l'estimation de la probabilité - Alternative F	65
Tableau 37 : Statistiques de l'estimation de la probabilité - Alternative G	68
Tableau 38 : Statistiques de l'estimation de la probabilité - Alternative H.....	70
Tableau 39 : Statistiques de l'estimation de la probabilité - Alternative I	72
Tableau 40 : Statistiques de l'estimation de la probabilité - Alternative J	75
Tableau 41 : Résultats globaux	78
Tableau 42 : Analyse comparative des alternatives A et E.....	82
Tableau 43 : Analyse comparative des alternatives B et F	83
Tableau 44 : Analyse comparative des alternatives C et D	83
Tableau 45 : Analyse comparative des alternatives A et B.....	84
Tableau 46 : Analyse comparative des alternatives E et F.....	84

1 INTRODUCTION

L'utilisation des machines dans les différents domaines de l'industrie rend les opérateurs et les utilisateurs exposés aux risques. Une bonne conception des machines et un fonctionnement correct et sûr, permet de réduire les risques d'accidents.

Dans la province de Québec, des accidents impliquant des machines se produisent dans tous les secteurs de l'économie. En général, ces accidents sont causés par l'accès des travailleurs à la zone dangereuse des machines, et dans la plupart des cas, ces accidents auraient pu être évités. Entre 1999 et 2003, sur les 101 décès de travailleurs en relation avec les machines, 52 travailleurs sont morts après avoir été coincés, écrasés, frappés ou happés par les pièces en mouvement d'une machine (IRSST, 2008).

Dans le cadre de la sécurité des machines, la norme ISO 12100 (2010) a été créée par le comité technique ISO/TC 199, *Sécurité des machines*. Issus des travaux de ce comité, la norme ISO 12100 (2010), *Sécurité des machines, Notions fondamentales, principes généraux de conception*, a comme objectif principal de fournir les informations nécessaires pour construire des machines plus sûres pour l'usage prévu. La première partie de la norme fournit la terminologie et la méthodologie de base pour la conception d'une machine et des normes de sécurité pour les machines, la deuxième partie donne les principes techniques et la façon dont ces principes doivent être appliqués à l'aide de techniques disponibles. La norme donne également les principes pour l'appréciation du risque, fait une description des procédures d'identification de phénomènes dangereux, d'estimation et d'évaluation du risque, donne des conseils sur les décisions à prendre en matière de sécurité des machines et sur le type de documentation nécessaire pour vérifier l'appréciation du risque qui a été menée.

Elle donne également les lignes directrices pratiques et des exemples de méthodes, ce qui constitue un guide pratique pour l'appréciation du risque reliés aux machines industrielles. Elle décrit diverses méthodes et outils pour chaque étape du procédé, constituant aussi un modèle en matière de réduction du risque des machines et en matière de choix de mesures de protection appropriés.

L'appréciation du risque est définie comme un *processus global d'analyse et d'évaluation du risque* (ISO 12100, 2010) et consiste en une série d'étapes logiques qui permettent d'analyser et d'évaluer, de façon systématique, les risques associés aux machines (Figure 1).

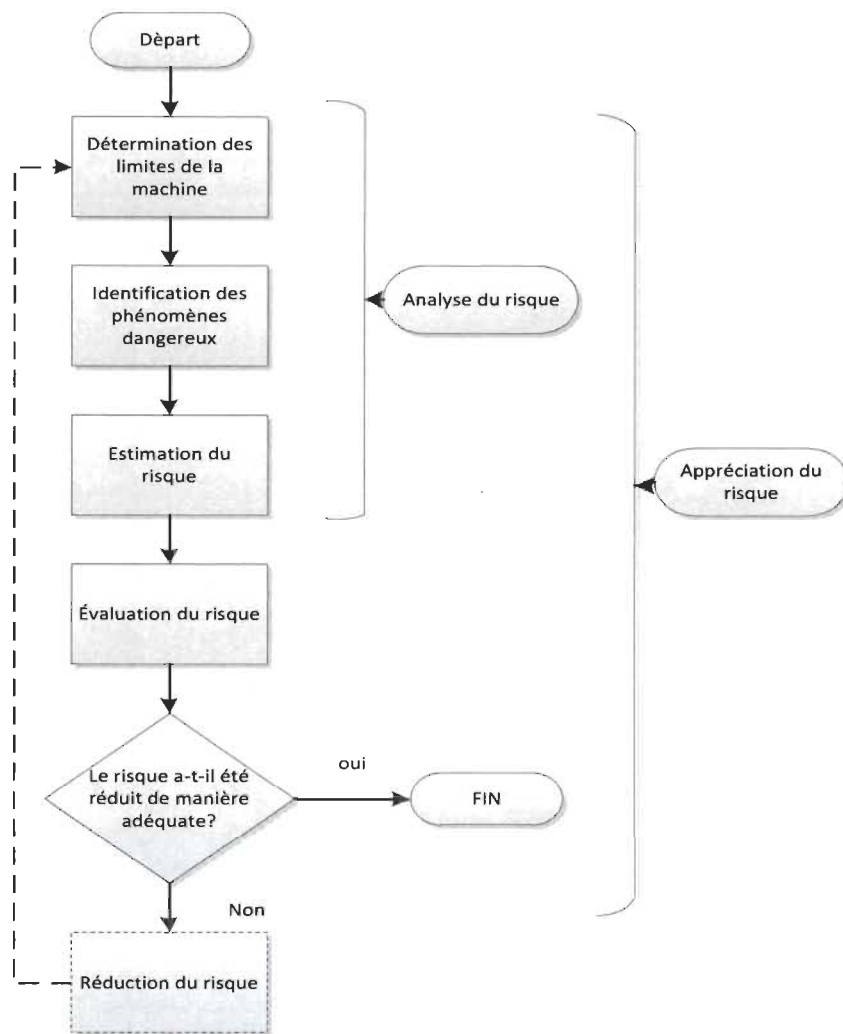


Figure 1 : Processus itératif pour réduire le risque (ISO 12100, 2010)

L'appréciation du risque commence par la détermination des limites de la machine. Elle comprend la collecte et l'analyse d'informations en ce qui concerne les parties, les mécanismes et les fonctions d'une machine. Il est également nécessaire de tenir compte de tous les types d'interaction humaine avec la machine et l'environnement dans lequel la machine fonctionne. L'objectif est d'obtenir une compréhension claire de la machine et de son utilisation. Il est important de tenir compte de toutes les limites et phases du cycle de vie de la machine, y compris l'installation, la mise en service, la maintenance, la mise hors service, l'utilisation et le bon fonctionnement ainsi que des conséquences d'une mauvaise utilisation ou d'un mauvais fonctionnement raisonnablement prévisibles.

La deuxième étape dans l'appréciation du risque est l'identification des phénomènes dangereux, qui est considérée comme l'étape la plus importante dans la phase d'appréciation du risque ISO 12100 (2010), car avec les informations obtenues à cette étape, on alimente directement l'estimation du risque. L'estimation du risque est la troisième étape dans le processus d'appréciation du risque. Selon la norme ISO 12100 (2010), l'estimation du risque consiste à déterminer un niveau du risque à partir d'une combinaison de la gravité du dommage, et de sa probabilité d'occurrence.

Le tableau 1 montre les éléments du risque. La gravité du dommage est définie comme la gravité des blessures ou des atteintes à la santé et l'étendue des dommages selon le nombre de personnes pouvant être touchées. Selon la norme ISO 12100 (2010), il y a trois facteurs à considérer dans la gravité du dommage. Le premier est la nature de ce qui est à protéger, c'est-à-dire les personnes, les biens et l'environnement. Le deuxième est, pour les personnes, la gravité des lésions ou atteintes à la santé. Le troisième est l'importance de l'étendue du dommage, c'est-à-dire une ou plusieurs personnes concernées.

Tableau 1 : Éléments du risque (ISO 12100, 2010)

Le risque Relatif au phénomène dangereux considéré	Est une fonction de	La Gravité du dommage. Possible pouvant résulter du phénomène dangereux considéré	et de	La probabilité d'occurrence de ce dommage
				Exposition de la ou des personnes au phénomène dangereux
				Probabilité d'occurrence d'un événement dangereux
				Possibilité d'éviter ou de limiter le dommage

La probabilité d'occurrence du dommage est exprimée en fonction de l'exposition de la ou des personnes au phénomène dangereux, de l'occurrence d'un événement dangereux et des possibilités techniques et humaines d'éviter ou de limiter le dommage.

Pour déterminer la fréquence et la durée d'exposition au phénomène dangereux, on doit tenir compte de tous les modes de fonctionnement de la machine et de toutes les méthodes utilisées pour faire les travaux sur cette machine. La fréquence de l'exposition est déterminée par le nombre de fois que les personnes ont accès à un phénomène dangereux. Par exemple, le nombre de jours par an, le nombre de fois par jour ou le nombre de fois par heure. La durée d'exposition au phénomène dangereux peut être établie en nombre de jours par an ou en nombre d'heures par jour. Selon la norme ISO 12100 (2010), l'exposition au

phénomène dangereux peut être déterminée en tenant compte des éléments suivants : le besoin d'accéder à la zone dangereuse (pour le fonctionnement normal, la maintenance ou la réparation), la raison de l'accès (l'alimentation manuelle de matières), le temps passé dans la zone dangereuse, le nombre de personnes devant y accéder et la fréquence d'accès.

La probabilité d'occurrence d'un événement dangereux peut être influencée par une défaillance de la machine ou de l'opérateur de la machine. Pour déterminer l'occurrence de l'événement dangereux, il faut prendre en considération les données historiques d'accidents ou d'incidents de la machine, la fiabilité de la machine, la fiabilité du procédé utilisé et la fiabilité de l'opérateur de la machine (erreur humaine).

Selon la norme ISO 12100 (2010), la possibilité d'évitement, qui permet d'empêcher que le dommage se produise ou de le limiter, est déterminée en fonction : des travailleurs qui utilisent la machine ; de la rapidité d'apparition du phénomène dangereux ; de la conscience de l'existence du phénomène dangereux et de la possibilité pour le travailleur d'éviter ou de limiter le dommage (par exemple, action, réflexe, agilité, possibilité de fuite).

La présente recherche est orientée vers l'étude des paramètres de probabilité utilisés dans l'estimation du risque en sécurité de machines, c'est-à-dire le paramètre de probabilité d'occurrence du dommage et le paramètre de probabilité d'occurrence d'un événement dangereux.

Dans les chapitres suivants, les objectifs de cette recherche sont décrits, en commençant par l'objectif général, suivi par les objectifs secondaires. Ensuite, la méthodologie utilisée pour atteindre ces objectifs est précisée. Après, est présenté la revue de la littérature incluant les différentes échelles de mesure et la façon dont les paramètres de probabilité sont mesurés. Enfin, les résultats et les conclusions de la recherche sont présentés.

2 PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS DE RECHERCHE

2.1 Problématique de la recherche

Au cours de la dernière décennie, plusieurs outils ont été développés par divers organismes et entreprises afin de mieux encadrer la définition des paramètres et le processus menant à l'estimation du risque (Main, B., 2004). Des études antérieures ont été réalisées afin de recueillir des données sur un grand nombre de ces outils (Paques, J.J., Gauthier, F. 2007 ; Paques, J.-J., Gauthier, F., Perez, A., Charpentier, P. Lamy, P. David, R. 2006 ; Moulet, F. 2010). Les objectifs de ces études étaient d'analyser ces outils sous l'angle de leurs caractéristiques, de leur construction et de leur aptitude à estimer le risque de façon fiable et robuste. Plusieurs facteurs importants ont été relevés au cours de ces études, en particulier la définition des paramètres principaux et secondaires utilisés, de même que le nombre et la définition des différents niveaux de ces paramètres.

Ces études ont permis de démontrer que la manière de définir les paramètres de probabilité en sécurité de machines (probabilité du dommage et probabilité d'occurrence de l'événement dangereux) pouvait grandement influencer les utilisateurs des outils d'estimation du risque.

Actuellement, il y a peu d'information sur les impacts que peuvent avoir les manières de définir les paramètres de probabilité dans l'estimation du risque en sécurité des machines.

2.2 Objectifs

L'objectif général de cette étude est d'évaluer les impacts (justesse et précision) que peut avoir la manière dont est défini le paramètre de probabilité d'occurrence du dommage lors de son évaluation.

Pour atteindre l'objectif général, les objectifs secondaires suivants sont considérés :

1. Identifier les types d'échelles de mesure utilisées dans différents domaines pour définir les paramètres de probabilité, avec leurs avantages et inconvénients.
2. Déterminer les types de structures employés pour définir les paramètres de probabilité dans les outils d'estimation du risque en sécurité de machines.
3. Établir les avantages et inconvénients des différents types de structures utilisés pour définir les paramètres de probabilités dans les outils d'estimation du risque en sécurité de machines.

4. Réaliser une étude expérimentale en utilisant les manières de définir les paramètres de probabilité et évaluer leurs performances.

3 REVUE DE LA LITTÉRATURE

Dans la vie quotidienne, le concept de mesure peut sembler familier. La mesure peut être appliquée à des phénomènes physiques et psychologiques. Des phénomènes physiques, comme la température du corps, la taille ou le poids d'un objet, peuvent être mesurés directement à l'aide d'appareils de mesure, comme un thermomètre, un ruban ou une balance. Les résultats de la mesure permettent de classer et comparer les objets de façon totalement impartiale. Des phénomènes psychologiques, comme l'estimation du risque, constituent un plus grand défi que la mesure des phénomènes physiques, parce que les attributs psychologiques sont des abstractions théoriques qui peuvent être considérés indirectement.

3.1 La mesure

La mesure est une sorte de constat rigoureux dans des conditions contrôlées et souvent avec des motifs précis. Il s'agit d'une description rigoureuse et sans ambiguïté qui a une signification constante pour la communauté scientifique et professionnelle. Mesurer, c'est remplacer systématiquement les choses ou ses propriétés par des nombres ou des codes, de telle sorte l'on peut utiliser les nombres ou codes comme s'ils étaient une représentation de ce que l'on souhaite montrer (Stevens, 1946).

La mesure peut être subjective ou objective. Selon les dictionnaires Le Robert (2013), le terme « subjectif » est défini comme : *ce qui concerne le sujet en tant qu'être conscient*. On propose ainsi classiquement que la subjectivité est relative au sujet pensant et que l'objectivité est relative à l'objet pensé.

3.2 Théorie de la mesure

Sur une période de sept ans (1932-1940), un comité de l'Association britannique pour l'avancement des sciences a examiné le problème de la mesure. On a demandé au comité d'examiner et de faire rapport sur la possibilité d'estimations quantitatives des événements sensoriels, à savoir s'il était possible de mesurer les sentiments humains. Pour son rapport final (1940), le comité a choisi un élément commun à leurs débats, de diriger leurs arguments à un exemple concret d'une échelle sensorielle. Le comité a choisi l'échelle de son « sone » (Stevens et Davis, 1938), qui est utilisée pour mesurer l'ampleur subjective de la sensation auditive, avec les mêmes propriétés que les échelles utilisées pour mesurer la longueur et le poids. En 1946, le psychologue Stanley Smith Stevens a publié un article dans la revue

Science qui a eu un impact énorme sur la façon dont les spécialistes du comportement ont pensé et utilisé la mesure. L'article a été la réponse de Stevens à une opinion largement répandue à l'époque, à l'effet que les formes légitimes de mesure qui étaient plus fortes que le comptage ou l'ordre numérique étaient fondées nécessairement sur l'existence d'une forme empirique observable: l'addition. Puisque les phénomènes psychologiques étaient dépourvus généralement de telles formes, de nombreux scientifiques croyaient que la psychologie n'était pas et ne serait jamais une science quantitative fondée sur des principes philosophiquement sains. Stevens et d'autres psychologues pensaient autrement (Narens, 2002).

Dans son article paru dans « Science » et son manuel largement cité « Handbook of Experimental Psychology », Stevens (1951) a présenté une théorie radicalement différente de la mesure et a appelé à une nouvelle méthode de mesure basée sur des estimations subjectives. Il est possible de dire que la mesure existe dans une variété de formes et que les échelles de mesure tombent dans certaines classes définies, ces classes sont déterminées tant par des opérations empiriques impliquées dans le processus de "mesure" que par des propriétés formelles (mathématiques) des échelles.

En outre, et cela est d'une grande importance pour de nombreuses autres sciences, les manipulations statistiques qui peuvent légitimement être appliquées à des données empiriques dépendent de l'échelle sur laquelle les données sont classifiées.

3.3 Les échelles de mesure

Les échelles sont un ensemble d'outils qui sont construits pour mesurer ou quantifier les réponses à certaines questions, en particulier celles qui sont liées à des sentiments, des attitudes, des opinions ou des croyances (Stevens, 1946).

Selon Stevens (1946), la mesure consiste à attribuer des nombres aux objets ou aux événements selon certaines règles. Le fait que les nombres peuvent être attribués sous différentes règles conduit à différents types d'échelles et par conséquent à différents types de mesure. Une échelle n'est possible que si le principe d'isomorphisme est respecté, c'est à dire, les mêmes relations qui existent entre les phénomènes ou objets, doivent aussi se produire entre les nombres assignés à chaque phénomène. La classification de Stevens (1946) considère quatre types d'échelle : nominale, ordinale, intervalle et le rapport.

3.3.1 Les échelles de base





3.3.1.1 Echelle nominale

Elle permet d'identifier et de classer des objets ou des phénomènes, par les caractéristiques, les types ou les noms choisis, en leur donnant un nom ou un symbole. Une échelle nominale sert uniquement à différencier les catégories d'une variable au moyen de codes. Elle ne permet pas d'établir une relation d'ordre ou de proportion entre les codes, ni d'effectuer des opérations arithmétiques (addition, soustraction, multiplication, division) sur ceux-ci (Stevens, 1946).

Le tableau 2 montre un exemple d'une échelle nominale. Dans une course de vélo, pour identifier les participants, un nombre unique est attribué à chacun, le numéro attribué ne détermine pas l'ordre des participants, ni la quantité des caractéristiques de chacun, c'est-à-dire le participant avec le nombre 65 n'a pas plus de capacité que celui qui a le nombre 21. Pour classer les participants en accord avec l'âge, une lettre est attribuée. Pour les participants qui ont entre 17 et 20 ans, la lettre « A » est attribuée, entre 21 et 34 ans « B » et 35 ans et plus « C ». Les participants classés dans chaque lettre sont considérés équivalents par rapport à l'âge.

Lorsque les nombres sont utilisés pour représenter les différents types de l'échelle nominale, ils n'ont pas de propriétés quantitatives et ne sont utilisés que pour identifier les classes. Dans le cas de la course de vélo, il est aussi possible de classer les participants en rapport avec leur niveau d'expérience en utilisant des nombres : pour les expérimentés le nombre 1 est assigné et le nombre 2 pour les non expérimentés.

Tableau 2 : Échelle nominale (source des images: Google.ca)

Participant course de vélo	Echelle Nominale		
	Identification avec un nombre	Classification selon l'âge	Classification selon l'expérience
	58	C	1
	21	A	2
	65	B	1
	34	C	1





La seule opération autorisée avec les nombres dans une échelle nominale est l'opération de comptage. Seul un nombre limité de statistiques est accepté, celles-ci étant basées sur le calcul de fréquences. Il s'agit notamment de pourcentages, du mode, du chi carré et des tests binomiaux.

3.3.1.2 Échelle ordinale

Aussi appelée échelle de niveau hiérarchique. Sur une caractéristique d'intérêt est assigné un code à chaque catégorie ou classe. L'échelle ordinale n'indique pas la magnitude de la différence entre les objets (Stevens, 1946).

Suivant l'exemple de la course de vélo (tableau 3), dans ce cas les participants sont triés selon l'ordre d'arrivée à la fin du parcours. L'ordre attribué ne détermine pas la quantité d'espace entre chaque participant, c'est-à-dire le participant qui est deuxième à l'arrivée n'a pas pris deux fois plus de temps que le participant arrivé le premier. Le nombre 1 est attribué au participant qui est arrivé en premier à la ligne d'arrivée, le nombre 2 est attribué au participant qui est arrivé deuxième à la ligne d'arrivée, et ainsi de suite. Il aurait aussi été possible de trier les participants selon l'âge, du plus jeune au plus vieux, c'est à dire « A » (nombre 21), « B » (nombre 65) et « C » (nombres 58 et 34).

Tableau 3 : Echelle ordinale (source des images: Google.ca)

Participant course de vélo	Échelle Nominale	Échelle Ordinale	
	Identification avec un nombre	Ordre d'arrivée à la ligne d'arrivée	Transformation monotone
	58	1	10
	21	2	20
	65	30	30
	34	4	40

Les chiffres utilisés dans les échelles ordinales ne sont pas quantitatifs, mais indiquent exclusivement la position dans l'ensemble ordonné et non la différence entre les positions successives de l'échelle. Cela reflète simplement les ordres sans savoir quelle distance il y a entre deux points.

Dans une échelle ordinale, n'importe quelle transformation positive monotone (qui préserve l'ordre) est permise. Dans le cas de l'exemple de la course de vélo, il est possible d'avoir une échelle équivalente qui est obtenue par la transformation monotone de la première échelle, en la multipliant par 10. Régulièrement le plus grand nombre est assigné à la classe supérieure ou préférée. Bien sûr, des nombres inférieurs peuvent être utilisés pour les degrés supérieurs (première classe, deuxième classe, etc) tant que cela est conforme et indifférent à l'utilisation de nombre plus ou moins pour signifier « plus » ou « supérieur ».





Dans une échelle ordinale, en plus de l'opération de comptage permise pour les données de l'échelle nominale, l'utilisation de statistique basée en centiles est aussi acceptée : centiles, quartile, moyenne et corrélation de rangs ordonnés. Par contre, elle ne permet pas d'effectuer des opérations arithmétiques (addition, soustraction, division).

3.3.1.3 *Échelle d'intervalle*

L'échelle d'intervalle représente un niveau de mesure plus précis, mathématiquement parlant, que les échelles nominales et ordinales. Non seulement c'est un ordre établi dans les positions relatives des objets ou des individus, mais cela mesure aussi la distance entre les intervalles ou les différentes catégories ou classes. Une échelle d'intervalle sert à différencier les valeurs de la variable, à les ordonner et à les comparer au moyen de la soustraction, mais non de la division. Ce type d'échelle est caractérisé par le fait que le zéro et la graduation sont fixés par convention (Stevens, 1946).

Le tableau 4 montre l'exemple de la course de vélo avec l'échelle d'intervalle. La performance des participants de la course de vélo est placée dans une échelle originale de 1 à 4 et dans une échelle équivalente. Dans ce cas, il est possible de trier les participants selon leur performance, mesurer la distance ou variation de la performance entre chaque participant et avoir les intervalles de la performance. Les distances numériquement égales dans l'échelle représentent des valeurs égales dans la caractéristique mesurée, par exemple la soustraction entre la performance 8,5 et 8,0 est égale à la soustraction entre 9,0 et 8,5.

Tableau 4 : Échelle d'intervalle (source des images: Google.ca)

Participant course de vélo	Échelle d'intervalle	
	Échelle originale (1 à 4)	Échelle équivalente
	4	9,5
	3	9,0
	2	8,5
	1	8,0





Une échelle d'intervalle est caractérisée par une unité de mesure commune et constante, qui est donnée de façon arbitraire comme le point zéro. Dans ce type de mesure, le rapport de deux intervalles est indépendant de l'unité de mesure et du point zéro. Toute transformation linéaire positive de la forme ($y = ax + b$) conservera les propriétés de l'échelle, où « y » est la valeur transformée, « b » est n'importe quelle constante, « a » est une constante positive et « x » est la valeur de l'échelle originale. Pour le cas de la course de vélo, la transformation est la suivante : $y = 0,5(x) + 7,5$, où $x_1 = 1$, $y_1 = 8$; pour $x_2 = 2$, $y_2 = 8,5$; pour $x_3 = 3$, $y_3 = 9,0$; pour $x_4 = 4$, $y_4 = 9,5$.

Les techniques statistiques qui peuvent être utilisées avec les données de l'échelle de l'intervalle comprennent toutes celles qui s'appliquent aux données nominales et ordinales. En plus, il est possible de calculer la moyenne arithmétique, l'écart-type, et les corrélations de produit-moment.

3.3.1.4 Échelle de rapport

Une échelle de rapport a toutes les propriétés des échelles nominale, ordinale et d'intervalle, en plus d'avoir un point zéro absolu. Dans cette échelle il est possible d'identifier, de classer, de hiérarchiser et de comparer les intervalles ou les différences des objets au moyen de la soustraction ou de la division. Le zéro absolu ou naturel représente la nullité de ce qui est étudié (Stevens, 1946).

Tableau 5 : Échelle de rapport (source des images: Google.ca)

Participant course de vélo	Échelle de Rapport	
	Temps pris (minutes)	Temps pris (secondes)
	90	5400
	94	5640
	101	6060
	105	6300

Suivant l'exemple de la course de vélo (tableau 5), dans ce cas, le temps pris par chaque participant de la course de vélo est déterminé. L'unité utilisée pour mesurer le temps est la minute et le zéro indique qu'il n'y pas de temps mesuré. Les participants sont triés par le temps pris. Il est possible d'avoir les intervalles du temps pris dans la course; par exemple il est possible de dire par rapport au participant qui a pris 90 minutes, que le participant qui a pris 105 minutes, a pris 17% plus de temps. C'est-à dire qu'il est possible de savoir dans quelle proportion le temps d'un participant est supérieur ou inférieur à un autre.

Les échelles de rapport permettent la transformation de la forme « $y = bx$ », où « y » est la valeur transformée, « b » est une constante positive et « x » est la valeur de la variable. Dans le cas du participant qui a pris 90 minutes, il est possible d'avoir le temps en secondes.

$$y = bx \quad \text{où}$$

$$b = 60 \text{ sec/min}$$

$$\text{si } x = 90 \text{ min, alors}$$





$$y = 5400 \text{ secondes.}$$

Il est important de remarquer que la constante positive ne peut pas être attribuée arbitrairement. Toutes les techniques statistiques sont applicables aux données de rapport, comme la moyenne géométrique, la moyenne harmonique et le coefficient de variation.

Le tableau 6 montre un résumé des échelles de mesure où il est possible de voir quelques caractéristiques de chaque échelle. Pour l'échelle nominale, l'identification des participants de la course en utilisant des nombres. L'échelle ordinale montre la caractéristique de

classification des participants selon l'ordre d'arrivée à la fin du parcours. L'échelle d'intervalle montre les intervalles de performance des participants et l'échelle de ratio montre le temps pris par chaque participant.

Tableau 6 : Résumé des échelles de mesure (source des images: Google.ca)

Participant course de vélo	Échelle Nominale	Échelle Ordinale	Échelle d'intervalle	Échelle de Rapport
	Identification avec un nombre	Ordre d'arrivée à la ligne d'arrivée	Performance	Temps pris (minutes)
	58	1	9,5	90
	21	2	9,0	94
	65	3	8,5	101
	34	4	8,0	105

3.3.2 Les échelles d'attitudes

Le concept d'attitude a fait l'objet de plusieurs recherches depuis environ 100 ans. Pendant tout ce temps, le concept a eu différentes approches qui ont changé son orientation. Selon Thomas et Alaphilippe (1983), le terme « attitude » évoque, dans le langage ordinaire, une manière de sentir, une position du corps et au figuré, une conduite qu'on adopte dans certaines circonstances.

Prenant son origine du mot latin *aptitudo*, la notion d'attitude présente donc au départ une analogie avec celle d'aptitude. On conçoit ainsi que l'attitude est une disposition à agir, voire une force acquise qui pousse l'individu à se conduire d'une certaine manière. En adoptant des termes plus techniques, la caractéristique d'une attitude est d'être une réponse à un stimulus social (Potvin, 1993).

Selon Tapia et Roussay (1991), les attitudes assurent trois fonctions psychologiques indispensables à l'individu pour aborder son environnement : la fonction cognitive, la fonction conative et la fonction affective. La fonction cognitive sous-entend le rôle que joue l'attitude dans l'élaboration des jugements, des croyances et des opinions ainsi que sur l'identification des objets perçus ; la fonction conative concerne les intentions et décisions d'actions des individus, cette fonction détermine le seuil d'apparition d'un comportement, sa durée et son

intensité; la fonction affective désigne la possibilité que l'attitude oriente les comportements du sujet face au foisonnement des stimulations qu'il reçoit.

Les échelles d'attitudes sont des instruments de mesure, puisqu'en effet, par l'étude de la cohérence des opinions sur un même sujet, elles permettent de cerner le champ d'une attitude, de définir celle-ci en tant que continuum. En évaluant le degré d'acceptation ou de refus de ces opinions, elles autorisent le positionnement des individus sur ce même continuum (Tapia et Roussay 1991).

Les échelles d'attitudes les plus utilisées dans le domaine de la recherche sont présentées ici : l'échelle de Thurstone, l'échelle Likert, l'échelle de Guttman, l'échelle sémantique différentielle et l'échelle visuelle analogue.

3.3.2.1 *Échelle de Thurstone*

La première des techniques de construction et d'application d'échelles d'attitudes a été élaborée par Thurstone, qui considérait l'opinion comme l'expression verbale d'attitude. Une mesure de l'indice de l'acceptation ou du rejet de l'opinion des personnes permet d'obtenir indirectement une mesure de leurs attitudes.

Le fondement de l'échelle Thurstone ou « échelle à intervalles apparaissant égaux » est l'existence de l'attitude définie comme un continuum psychique. De sorte que l'accord, le désaccord ou même l'indifférence à l'égard d'une question donnée font partie du même ensemble et expriment les différences non de nature mais de degré qui se répartissent, comme les nombres, le long d'une série arithmétique.

L'objectif du constructeur de l'échelle est de créer, dès lors, un continuum de stimuli qui reproduise le continuum psychique de sorte que la valeur de chaque item rende compte de celle du degré d'attitude correspondant (Alexandre, 1971). L'échelle de Thurstone permet de représenter de manière ordonnée la position d'un individu sur un continuum figurant une attitude, et aussi d'évaluer les écarts entre les différentes positions.

Le tableau 7 montre une échelle de 22 items avec des réponses d'un sujet(x), construite par Ellickson selon la méthode des intervalles apparaissant égaux de Thurstone et dont la fidélité vaut 0,86. Un haut score indique une attitude favorable au divorce.

Pour obtenir le score du sujet dont les réponses sont présentées dans le tableau 7, on calcule donc la moyenne des valeurs sur l'échelle de chaque item pour lesquels l'individu a

marqué son accord (c'est-à-dire les items 1, 2, 4, 8, 10, 13, 16, 18, 19 et 21). Ce sujet obtient une valeur moyenne de $(3,7+6,6+1,6+9,8+10,1+3,3+0,8+7,1+4,2+3,8)/10 = 5,1$ et présente plutôt une attitude défavorable, mais de manière assez faible, face au divorce.

Tableau 7 : Exemple d'une échelle de Thurstone utilisée pour mesurer l'attitude face au divorce (Alexandre, 1971)

Item	Valeur d'échelle	Accord	Désaccord
1. Le divorce est seulement justifiable lorsque tous les efforts pour raccommoder l'union ont échoué.	3,7	X	
2. Les conditions actuelles du divorce ne sont pas aussi déshonorantes qu'il apparaît.	6,6	X	
3. Si le mariage est basé sur l'affection mutuelle, le divorce doit être facile à obtenir.	8,5		X
4. Le divorce abaisse le niveau général de la moralité.	1,6	X	
5. Le divorce est scandaleux.	0,5		X
6. Le divorce est souhaitable pour corriger les erreurs dans le mariage.	8,4		X
7. Le divorce est un mal nécessaire.	4,8		X
8. Le divorce devrait être accordé par simple demande.	9,8	X	
9. Un divorce est justifiable ou non selon les besoins de personnes impliquées.	6,2		X
10. Une personne devrait avoir le droit de se marier ou de divorcer aussi souvent qu'elle le voudrait.	10,1	X	
11. Le divorce n'est jamais justifiable.	0,5		X
12. La liberté du divorce conduit à une compréhension plus intelligente du mariage.	8,8		X
13. Le divorce devrait être découragé afin de stabiliser la société.	3,3	X	
14. Les inconvénients du divorce ne devraient pas nous empêcher d'en voir les avantages.	5,8		X
15. Le contrat de mariage devrait être aussi facilement rompu qu'il est établi.	9,4		X
16. La meilleure solution au problème du divorce est de ne jamais l'accorder.	0,8	X	
17. Le divorce facile est l'équivalent de la polygamie.	1,2		X
18. Le divorce devrait être autorisé lorsque les droits de toutes les parties sont assurés.	7,1	X	
19. Le divorce devrait être découragé mais non interdit.	4,2	X	
20. Le divorce est l'adultère rendu légal.	0,8		X
21. Une longue et soigneuse enquête devrait précéder la prononciation du divorce.	3,8	X	
22. L'indissolubilité du mariage n'est pas nécessaire pour la stabilité de la société.	8,1		X

Les avantages de ce type d'échelle sont :

- Permet de connaître comment est la distribution des valeurs d'un groupe (sous-échantillon) autour de l'attitude étudiée, parce que les items sont conçus pour couvrir tout le continuum de la variable (Alexandre, 1971).
- Possibilité d'utiliser une même échelle, pour étudier les attitudes de divers ensembles de sujets à l'égard d'un même objet (Macar, 1976).
- La valeur des items part d'une preuve à caractère « objectif » (un "raffinement de mesure"), parce que la valeur scalaire de chaque énoncé est dérivée d'une valeur donnée par les juges (Alexandre, 1971).

Les inconvénients de ce type d'échelle sont :

- Le processus d'élaboration est très long et coûteux (Pol, 1967)
- Manque d'unidimensionnalité, c'est-à-dire l'existence d'un véritable continuum, est une condition souvent difficile à rencontrer (Alexandre, 1971).
- Une influence possible des juges sur l'évaluation des items (McIver, 1981; Pol, 1967).
- Difficile de déterminer des intervalles supposés égaux, condition nécessaire pour avoir une véritable échelle de mesure et non une échelle ordinale (Alexandre, 1971).

3.3.2.2 *L'échelle de Likert*

Cette méthode a été exposée par Rensis Likert en 1932, et ses principes veulent éviter les distributions de propositions par les juges, éliminer les risques d'erreurs d'étalonnage et les lentes opérations de construction. L'échelle de Likert est au niveau ordinal, c'est-à-dire qu'elle ne permet pas d'évaluer les écarts entre des positions différentes sur le continuum de l'attitude.

Il y a deux éléments importants de la méthode Likert, l'échelle de Likert et l'élément Likert. Le nom échelle de Likert, est réservé pour appliquer à l'ensemble du questionnaire et le nom de l'élément de type Likert pour se référer à chaque élément individuellement. C'est-à-dire, qu'un élément de type Likert est une déclaration qui est faite pour les sujets afin qu'ils les évaluent en fonction de leur jugement subjectif. Généralement on demande aux sujets d'indiquer leur degré d'accord ou de désaccord.

Le tableau 8 montre une échelle de 10 énoncés de type Likert en 5 degrés (« tout à fait d'accord », « légèrement d'accord », « pas d'opinion », « légèrement en désaccord » et « absolument pas d'accord ») destinée à mesurer l'attitude à l'égard de l'autorité chez des étudiants. Les réponses sont notées de (+2) à (-2) pour les énoncés favorables et de (-2) à (+2) pour les énoncés défavorables. Un haut score indique une soumission à l'autorité, un score bas un refus de l'autorité (Alexandre, 1971).

Tableau 8 : Exemple d'une échelle Likert (Alexandre, 1971)

Énoncés	Tout à fait d'accord	Légèrement d'accord	Pas d'opinion	Légèrement en désaccord	Absolument pas d'accord
1. Quel que soit celui qui gouverne, nous devons exécuter ses ordres sans poser de questions.	+2	+1	0	-1	-2
2. C'est envers l'état que va le premier devoir de l'individu, en second lieu il va à lui-même.	+2	+1	0	-1	-2
3. Les processus démocratiques doivent être soigneusement protégés dans ce pays, même si le rendement s'en trouve, de ce fait, diminué.	-2	-1	0	+1	+2
4. Il est possible d'appliquer les principes démocratiques dans le fonctionnement et la direction des grandes entreprises.	+2	+1	0	-1	-2
5. Un citoyen a le droit de refuser son appui à des orientations nationales qu'il juge mauvaises.	-2	-1	0	+1	+2
6. Un citoyen a le droit de refuser son appui à des orientations nationales qui n'ont pas été approuvées démocratiquement.	-2	-1	0	+1	+2
7. Tenez-vous à recevoir des ordres d'une personne dument autorisée à les donner ? (Oui)	+2	+1	0	-1	-2
8. Les gens peuvent être encouragés mais non forcés à participer à un groupe d'action (ex. Action Nationale).	-2	-1	0	+1	+2
9. En période de menace de crise économique, il convient d'interdire les groupes minoritaires qui critiquent le gouvernement.	+2	+1	0	-1	-2
10. La discipline et l'obéissance sont les valeurs qui définissent le mieux le citoyen.	+2	+1	0	-1	-2

Les avantages de ce type d'échelle sont :

- L'échelle est facile à construire et à appliquer (Tapia, 1991).
- Une plus grande fiabilité de l'échelle par rapport à l'échelle de Thurstone (Alvarez, 1997)

Les inconvénients de type d'échelle sont :

- L'échelle ne permet pas d'évaluer les écarts entre des positions différentes sur le continuum de l'attitude (Alvarez, 1997).
- Le même score avec différentes combinaisons d'éléments peut être obtenu, ce qui montre que le même score peut avoir différentes significations (McIver, 1981; Tapia, 1991).

3.3.2.3 Échelle de Guttman

Cette méthode, appelée analyse hiérarchique, a été créée en 1944 par le sociologue américain Louis Guttman. Gutmann propose de construire une échelle de manière à ce que l'adhésion à des propositions plus exigeantes implique l'adhésion à d'autres propositions moins exigeantes et à ce que, inversement, le refus d'adhésion à des propositions peu exigeantes implique le refus d'adhésion à des propositions plus exigeantes (Macar, 1987).

L'objectif de cette échelle est atteint si on réussit à déterminer la correspondance exacte entre la variable quantitative qu'est le rang défini par la note et la variable qu'est l'attribut que l'on sait varier en fonction l'un de l'autre. Avec cette méthode, on cherche à obtenir une estimation rigoureuse de la mesure d'attitudes, et à éliminer les jugements et la corrélation item-test, utilisés dans les échelles Thurstone et Likert.

Le tableau ci-dessous montre une situation d'unidimensionnalité parfaite, un modèle idéal. Il y a quatre énoncés (1, 2, 3, 4) et cinq personnes (A, B, C, D, E). La valeur 1 indique que la personne a répondu « oui », la valeur 0, qu'elle a répondu « non ». L'énoncé 1 est la plus faible intensité, ce qui augmente jusqu'à l'énoncé 4, la plus intense. Lorsqu'une personne seulement répond « non » à un élément, elle est présumée être la plus intense dans ce cas, l'énoncé 4.

Tableau 9 : Échelle de Guttman

Énoncés	Personnes					Score total
	A	B	C	D	E	
1	1	1	1	1	0	4
2	1	1	1	0	0	3
3	1	1	0	0	0	2
4	1	0	0	0	0	1
Score total	4	3	2	1	0	

Supposons une enquête où la variable objective est la distance en kilomètres pour faire du jogging, il est possible d'établir une série des questions ordonnées de telle sorte qu'une réponse positive à la question ciblant la plus grande distance implique des réponses positives aux questions concernant la distance plus courte.

(A) peut faire du jogging cinq kilomètres.

(B) peut faire du jogging un kilomètre.

(C) peut faire du jogging la distance d'un pâté de maison

Chacun correspond à un niveau sur un continuum, à un degré différent d'endurance physique. L'élément C est de moindre intensité que le B et les deux de moindre intensité que le A. Celui qui a un point, a répondu « oui » à l'élément C, le moins intense. Celui qui a deux points, a répondu « oui » aux éléments C et B. Si une personne a deux points et un autre a un point, les deux ont répondu « oui » à l'élément C et à l'élément B la première personne a répondu « oui » et l'autre a répondu « non ».

Les avantages de ce type d'échelle sont :

- L'échelle permet de déterminer plus adéquatement à quel point les individus sont favorables à un objet d'attitude (Macar, 1976).
- La procédure de sélection des propositions permet de garantir le caractère unidimensionnel de l'échelle et d'assurer ainsi que les attitudes des sujets se réfèrent bien à un objet nettement spécifié et sont appréciées uniquement par référence à cet objet (Macar, 1976).

Les inconvénients de ce type d'échelle sont :

- Le processus d'élaboration est très laborieux, bien que les réponses soient standardisées, il est difficile d'obtenir des questionnaires assez longs pour avoir une bonne hiérarchisation des énoncés et en même temps assez proches de l'échelle parfaite pour réaliser une bonne validation des résultats (Alexandre, 1971).
- L'échelle ne peut être vraiment utilisée que sur la population d'où on a tiré l'échantillon qui a servi à mesurer sa reproductibilité (Alexandre, 1971).

3.3.2.4 *Échelle sémantique différentielle*

Cette échelle a été élaborée par Osgood, Suci et Tannenbaum (1957). Cette méthode analyse la signification sous-jacente, subjective et émotive que l'individu accorde à un concept ou à un objet, et donne une appréciation des différences individuelles dans la représentation ou l'interprétation sémantique d'un concept ou d'un objet. L'échelle consiste en une série d'échelles bipolaires à l'aide desquelles un concept ou un objet est évalué.

L'échelle sémantique différentielle utilise une série d'échelles de réponses dont les pôles sont normalement constitués d'adjectifs qualificatifs contraires, lesquels sont séparés par 5 ou 7 échelons qui sont autant de degrés intermédiaires alignés sur un continuum allant d'un pôle à l'autre. Des valeurs numériques sont attribuées à chacun de ces degrés. La somme des

réponses obtenues permet d'obtenir des scores qui sont ensuite interprétés comme des indices de l'attitude à l'égard du concept ou de l'objet évalué (Potvin, 1993).

Pour l'exemple présenté au tableau 10, une étude sur les attitudes à l'égard de la sécurité, demande aux sujets de déclarer à quel point ils estiment la sécurité dans le poste de travail :

Tableau 10 : Exemple d'échelle sémantique différentielle

	+3	+2	+1	0	-1	-2	-3	
Bonne								Mauvaise
Nécessaire								Inutile
Actuelle								Archaïque
Rationnelle								Absurde

Dans cette échelle il y a trois dimensions sous-jacentes de l'attitude et à chacune de ces dimensions correspondent des séries d'items (adjectifs) pertinents. La première dimension est la dimension évaluative, qui consiste en l'évaluation de l'objet ou du concept donné par l'individu, laquelle correspond à la dimension favorable et défavorable des échelles d'attitude plus traditionnelles, par exemple : bon – mauvais. La deuxième dimension est la dimension puissance, qui fait référence à la perception que l'individu se fait de la puissance ou de l'énergie inhérente à l'objet ou au concept, par exemple : fort-faible. Enfin, la troisième dimension est la dimension d'activité, qui correspond à la perception que l'individu se fait du caractère actif de l'objet ou du concept, par exemple : vite-lent. (Sellitz, 1977).

Les avantages de ce type d'échelle sont :

- L'échelle peut être utilisée pour mesurer l'attitude vers différents objets (Macar, 1967).
- L'élaboration de l'échelle peut se faire facilement (Macar, 1967)
- La possibilité de comparer des concepts des attitudes mesurées (Alexandre, 1971).

Les inconvénients de ce type d'échelle sont :

- L'échelle sémantique différentielle est plus utilisée dans la dimension d'évaluation que dans les dimensions de puissance et d'activité (Potvin, 1993).
- L'échelle peut-être à l'arbitraire du chercheur, puisque les couples d'adjectifs ou les couples d'expressions équivalentes ne sont pas ici sélectionnés à partir de réactions de juges ou de sujets (Macar, 1967).

3.3.2.5 Échelle visuelle analogue (EVA)

Une échelle visuelle analogue (EVA) est un instrument de mesure des caractéristiques subjectives ou des attitudes qui ne peuvent pas être mesurées directement. Les répondants précisent leur niveau d'accord sur une déclaration en indiquant une position le long d'une ligne continue entre deux points d'extrémité (Couper, 2006).

L'échelle visuelle analogue est habituellement une ligne horizontale de 100 mm de longueur, ancrée par mots descripteurs à chaque extrémité, comme illustrée dans la figure 3. La mesure est effectuée à partir de l'extrémité gauche à l'extrémité droite. Par exemple, il peut être demandé au superviseur de production d'une entreprise de fabrication de transformateurs électriques, d'estimer la probabilité qu'un opérateur subisse une électrocution pendant l'essai d'un transformateur. Comme le montre la figure 2, le superviseur a marqué un « X » sur la ligne, pour définir la probabilité en tenant compte que le côté gauche correspond à une probabilité nulle (« Impossible ») et que le côté droit correspond à une probabilité de 1.0 (« Certain »). Le (X) est placé à 5mm du côté gauche, c'est-à-dire que la probabilité estimée est 5%.

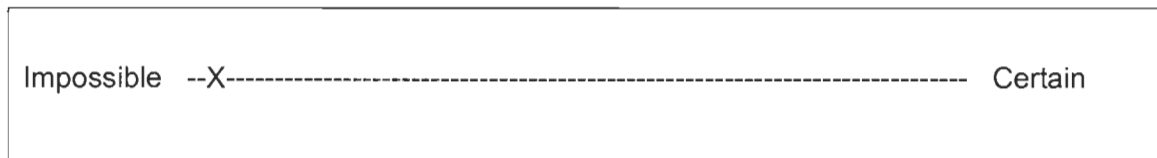


Figure 2 : Échelle visuelle analogue

Les avantages de ce type d'échelle sont :

- L'échelle est facile à répondre et a un haut niveau de fiabilité et de validité (Couper, 2006).
- L'échelle est facile à saisir pour le sujet ; elle est rapide à remplir et à marquer et elle ne nécessite pas beaucoup de motivation de la part du sujet (Bond, 1974).
- L'évaluateur n'est pas limité à des termes quantitatifs, il peut faire une discrimination fine comme il le souhaite (Bond, 1974).

Les inconvénients de ce type d'échelle sont :

1. L'échelle est visuelle et doit être auto administrée (Couper, 2006).

3.4 Mesure de la probabilité dans l'estimation du risque en sécurité des machines

La norme ISO 12100 (2010) précise que toutes les approches d'estimation du risque doivent inclure l'estimation de la probabilité d'occurrence du dommage en prenant en compte, l'exposition des personnes au phénomène dangereux, la probabilité d'occurrence d'un événement dangereux et les possibilités techniques et humaines d'éviter ou de limiter le dommage.

Selon cette norme, des méthodes quantitative et qualitative peuvent être utilisées pour estimer la probabilité. Les approches quantitatives se focalisent sur la modélisation quantitative de la probabilité, cherchant à déterminer la relation fonctionnelle qui la lie à un certain nombre de facteurs élémentaires. Elles nécessitent de disposer d'importantes sources de données, ce qui peut poser problème. Du fait de l'automatisation de tout ou d'une partie du processus d'estimation, cette faiblesse devient cependant un avantage lorsque de telles bases sont accessibles. Elles peuvent tenir compte de toute l'information disponible et fournir ainsi des estimations de la probabilité robustes et objectives (ISO 12100, 2010).

Les approches qualitatives sont plus utilisées, car sont plus facile à mettre en place. De ce fait, ces approches peuvent être appliquées quelle que soit la quantité de données dont on dispose pour effectuer l'analyse. Elles produisent également des résultats clairs qui permettent une bonne compréhension de la situation et qui vont de pair avec l'identification de leviers d'actions dans une optique de prévention. En revanche, le recours à l'expertise présente des contreparties: la subjectivité de l'analyse et le nombre limité d'informations qui peuvent être prises en considération du fait de la saturation des capacités cognitives des experts (personnes qui ont l'expérience, la connaissance et la maîtrise du sujet). De plus, de nombreux spécialistes doivent travailler ensemble, ce qui est long, coûteux et exige la mise en place d'un protocole structuré pour le recueil de jugements et l'agrégation de ces jugements (Hubbard et D. D. Evans, 2010).

3.4.1 Estimation qualitative de la probabilité

Dans l'estimation de la probabilité, des méthodes qualitatives sur une échelle ordinale sont utilisées, comme le montre l'étude réalisée par Moulet (2009). Pour définir la probabilité, ces méthodes tiennent compte des modes de fonctionnement de la machine, des techniques pour travailler sur la machine, de la fréquence d'exposition des personnes à un phénomène dangereux, des défaillances possibles de la machine, des défaillances possibles de

l'opérateur de la machine, des données historiques d'accidents ou d'incidents de la machine, de la fiabilité de la machine, de la fiabilité du procédé utilisé, de la fiabilité de l'opérateur de la machine, des travailleurs qui utilisent la machine, de la rapidité d'apparition du phénomène dangereux, de la conscience de l'existence du phénomène dangereux et de la possibilité pour le travailleur d'éviter ou de limiter le dommage.

Certaines méthodes associent la probabilité à un genre d'intervalle comme une unité de temps ou une activité, des événements, des unités produites, ou le cycle de vie d'une infrastructure, d'un équipement, d'un processus ou d'un produit.

Parmi les principaux avantages des méthodes qualitatives utilisées pour mesurer la probabilité dans l'estimation du risque on note : la facilité de les créer et de les enseigner, elles sont incluses dans des normes internationales et enfin, elles sont utilisées par des entreprises influentes dans le monde (Hubbard et D. D. Evans, 2010). Selon Terje et Genserik (2012), les interprétations basées sur la valeur sont les principaux inconvénients de l'estimation qualitative de la probabilité, car elles sont basées sur un malheureux mélange de l'évaluation des incertitudes et des jugements de valeur.

Dans l'estimation qualitative de la probabilité, la fiabilité des expressions verbales utilisées pour définir la probabilité est un inconvénient, car les personnes répondent de différentes façons à chaque expression (Beyth-Marom, 1982). Selon Evans et Hubbard (2010), les principaux inconvénients des méthodes qualitatives sont les suivants : les biais cognitifs, les différentes formes d'interprétation des étiquettes verbales et l'interprétation erronée de l'échelle utilisée.

Le biais cognitif, est une forme de pensée qui produit une variation systématique de jugement par rapport à une pensée rationnelle (Hubbard et D. D. Evans, 2010). La plupart des gens, au moment d'estimer la probabilité, ignorent les informations statistiques disponibles sur l'événement et comptent plutôt sur l'information disponible qu'ils ont en mémoire ; tels que des mémoires vives d'événements. Ce biais est connu comme « disponibilité heuristique » (Hubbard et D. D. Evans, 2010). Un autre biais est que les personnes ont tendance à supposer que les événements précédents ont une influence sur des événements futurs. Par exemple, lancer une pièce de monnaie 10 fois sur le côté face, est estimé avec plus de chances d'obtenir côté pile sur le proche lancement, alors qu'en réalité, à chaque tirage au sort, côté face et côté pile sont tout aussi probables l'un que l'autre. Les gens ont aussi tendance à surestimer la probabilité de succès des décisions, c'est à dire qu'ils pensent que

les choses sont mieux que ce qu'elles sont vraiment, ce biais est connu comme le biais d'optimisme. Quand les gens surestiment l'exactitude d'une prévision, c'est appelé « l'excès de confiance », par exemple, si une personne croit qu'il y a 90% de chance que l'accident ne se produira pas, alors la probabilité que l'événement se produise peut-être supérieur à 10% (Hubbard et D. D. Evans, 2010). Un autre biais cognitif affiché par les gens lors de l'estimation des risques est la tendance à donner plus de valeur aux idées ou aux opinions qui confirment ses propres idées ou opinions. Dans de nombreux cas, le biais de confirmation conduit à ignorer complètement les idées contraires aux leurs, ce qui en fait un seul point de vue. Les gens ont aussi tendance à s'attribuer de plus grandes responsabilités suite à leurs succès que devant leurs échecs, à la prise en charge face aux circonstances, à la chance ou aux personnes extérieures, c'est ce qu'on appelle le biais « d'auto complaisance ».

Un autre phénomène qui peut affecter le processus d'estimation de la probabilité est la façon dont les questions sont posées ; il est possible d'avoir des réponses significativement différentes à des questions qui sont logiquement identiques, par exemple, se demander quelle est la probabilité d'occurrence d'un accident du travail et quelle est la probabilité d'éviter un accident du travail ?

Un autre phénomène consiste en ce que les personnes peuvent faire différentes estimations du même événement lequel se présente dans des intervalles de temps différents. Par exemple, une étude de spécialistes de rayons X a montré que pour le même ensemble de cas examinés avec une semaine de différence, les pronostics ont eu une corrélation de 0,6, ce qui indique que les spécialistes peuvent faire différents pronostics quand les mêmes cas se présentent (Hubbard et D. D. Evans, 2010).

L'interprétation des étiquettes verbales fait partie des autres inconvénients des méthodes qualitatives. Les étiquettes verbales sont utilisées car on croit que les gens en utilisant ces étiquettes ont facilité pour faire l'estimation et que la méthode sera plus fiable. Par exemple, pour catégoriser la probabilité d'occurrence du dommage on utilise des étiquettes comme, « très probable », « probable », « peu probable », « très peu probable ». Selon Hubbard et Evans (2010), les personnes interprètent les étiquettes verbales de différentes façons d'où l'importance d'avoir des rangs de probabilité bien définis. Les personnes peuvent décrire la probabilité d'un événement qui est arrivé avec la même étiquette verbale et conclure qu'ils sont d'accord, mais les rangs de probabilité définis par chaque personne pour la même étiquette peuvent être différents. Une personne peut même donner un rang différent de

probabilité de la même étiquette, dans un autre contexte. Par exemple, pour une étiquette « probable » définie dans le rang de probabilité entre 0,7 et 0,9 ; une personne peut définir la probabilité comme 0,7 et une autre personne peut définir la probabilité comme 0,8, les deux personnes sont d'accord que la probabilité est « probable » mais les définitions de probabilité sont différentes.

Un autre des inconvénients des méthodes qualitatives est l'interprétation de l'échelle utilisée. Des gens ont tendance à interpréter les mesures effectuées sur une échelle ordinale comme si elles étaient faites sur une échelle de rapport. Cela conduit les personnes à faire des conclusions non valables qui peuvent générer une erreur d'estimation. Par exemple, si la probabilité est catégorisée initialement sous forme verbale (peu probable, très probable) et plus tard est convertie en une représentation numérique (à « peu probable » est attribué une valeur de « 2 », et à « très probable » une valeur de « 4 »), une personne peut traiter cette échelle ordinale comme une échelle de rapport et conclure que la probabilité de la deuxième catégorie est le double de la première (Hubbard et Evans, 2010).

4 MÉTHODOLOGIE DE RECHERCHE

La méthodologie se divise en trois axes principaux :

1. Déterminer les différentes manières dont le paramètre de probabilité d'occurrence du dommage et le paramètre de probabilité d'occurrence d'un événement dangereux sont définis dans les outils d'estimation du risque en sécurité de machines.
2. Élaborer des alternatives pour définir le paramètre de probabilité du dommage.
3. Réaliser une étude expérimentale permettant de comparer les résultats obtenus par l'utilisation de ces différentes définitions du paramètre de probabilité.

4.1 Détermination des manières de définir les paramètres de probabilité

En se basant sur l'étude de Moulet (2009), 29 outils d'estimation de risques utilisés en sécurité de machines ont été pris comme référence. De ces 29 outils, 21 utilisaient le paramètre de « probabilité d'occurrence du dommage » et 8 utilisaient le paramètre de « probabilité d'occurrence d'un événement dangereux ». Dans l'étude de Moulet (2009), les 21 outils utilisant le paramètre de « probabilité d'occurrence du dommage » étaient identifiés avec les numéros suivants : 1, 3, 6, 7, 10, 24, 33, 34, 35, 41, 44, 45, 46, 48, 58, 66, 85, 89, 94, 102 et 114. Les 8 outils utilisant le paramètre de « probabilité d'occurrence d'un événement dangereux » étaient identifiés avec les numéros suivants : 17, 19, 53, 57, 62, 67, 69 et 91. Les outils sont présentés à l'annexe 1.

Afin de déterminer la manière dont les paramètres de probabilité étaient définis dans ces outils, trois critères de classification ont été établis. Le premier critère était le type ou les types d'échelle de mesure utilisés, c'est-à-dire les échelles de base (ordinaire (O), nominale (N), d'intervalle (I) ou de rapport (R)) ou les échelles d'attitude (Thurstone, Likert, Guttman, Sémantique Différentielle ou Visuelle Analogue). Pour ce critère, une classification des outils a été réalisée conformément à une liste de contrôle, dans laquelle les caractéristiques principales de chaque échelle se sont rattachées.

Le deuxième critère était le nombre de niveaux utilisés pour définir les paramètres de probabilité, basé sur l'outil type présenté dans l'étude de Moulet (2009).

Le troisième critère reposait sur la manière avec laquelle étaient définis les niveaux dans chaque échelle de mesure, basé sur les définitions suivantes, tirées de Moulet (2009) :

- Qualitative simple : définit les niveaux avec des mots et ne donne pas l'information supplémentaire pour comprendre la définition. Par exemple : « rare ».
- Qualitative détaillée : définit les niveaux avec des mots et donne l'information supplémentaire pour mieux comprendre la définition. Par exemple : « rare : très improbable car près de zéro ».
- Quantitative simple : définit des niveaux avec des chiffres et ne donne pas l'information supplémentaire pour comprendre la définition. Par exemple : « 2×10^{-1} par an ».
- Quantitative détaillée : définit des niveaux avec des chiffres et donne l'information supplémentaire pour mieux comprendre la définition. Par exemple : « une probabilité de 1 fois par 5 ans ».

Le tableau 11 montre le résumé des critères utilisés pour déterminer les façons dont sont définis les paramètres de probabilité dans les outils d'estimations du risque en sécurité des machines.

Tableau 11 : Critères pour déterminer les façons de définir les paramètres de probabilité dans les outils d'estimation du risque en sécurité des machines

Critère	Description
Type d'échelle	Identifier quel type d'échelle est utilisée. Par exemple : échelle nominale, échelle ordinale, échelle d'intervalle, échelle de rapport, échelle de Thurstone, échelle de Likert, échelle de Gutmann, échelle sémantique différentielle.
Nombre de niveaux	Identifier le nombre de niveaux qui sont utilisés dans l'échelle de mesure.
Définition des niveaux	Déterminer la façon de définir des niveaux : qualitative simple, qualitative détaillée, quantitative simple, quantitative détaillée.

4.1.1 Identification des échelles de base

Chaque outil a été analysé et évalué en tenant compte des caractéristiques préétablies dans la section 3.3.1 et présentées au tableau 12. Les outils qui répondaient aux caractéristiques « a » et « b » (tableau 12) étaient catégorisés comme des outils qui utilisent une échelle nominale (N). Les outils qui répondent aux caractéristiques « a » jusqu'à « c » étaient catégorisés comme des outils qui utilisent une échelle ordinale (O). Les outils qui répondent aux caractéristiques « a » jusqu'à « g » étaient catégorisés comme des outils qui utilisent une

échelle d'intervalle (I). Les outils qui répondent à toutes les caractéristiques (sauf « f ») étaient catégorisés comme des outils qui utilisent une échelle de rapport (R).

Tableau 12 : Caractéristiques pour la classification des outils selon les échelles de base

Caractéristique		Échelle de base				Critères de décision
		Nominal	Ordinal	Intervalle	Rapport	
a	Identification ou classification du paramètre avec un nom ou un symbole (Stevens, 1946).	X	X	X	X	L'échelle utilise pour l'identification ou classification des niveaux du paramètre un nom ou un symbole. Exemple : la probabilité d'occurrence du dommage est : 1 Rare, 2 improbable, 3 probable, 4 très probable.
b	L'opération de comptage est possible (Stevens, 1946).	X	X	X	X	L'échelle permet le comptage. Exemple : Le niveau « rare » a été choisi 5 fois.
c	Il y a une relation d'ordre entre les niveaux (Stevens, 1946).		X	X	X	L'échelle permet une relation d'ordre. Exemple : l'ordre de la probabilité d'occurrence du dommage, de moins probable jusqu'à plus probable est : « rare », « improbable », « probable », « très probable ».
d	Les niveaux sont placés à des intervalles égaux à lesquels est possible de mesurer la distance entre chaque un (Hogan, 2012).			X	X	L'échelle permet que les données puissent être triées et les différences entre les valeurs ordonnées puissent être comparées. Exemple : pour connaître la température dans un local, quatre lectures de la température sont faites toutes les deux heures : 2050F, 2100F, 2150F, 2200 F ; l'écart de 50F entre 2050F et 2100F a la même signification qu'un écart de 50F entre 2150F et 2200F.
e	Il y a une unité de mesure commune et constante (Stevens, 1946).			X	X	L'échelle permet de mesurer les données avec une unité de mesure commune et constante. Exemple : pour mesurer l'âge d'une personne, est utilisé comme unité de mesure, ans.
f	L'unité de mesure et le point zéro sont fixés par convention (Stevens, 1946).			X	X	Dans l'échelle, le point zéro et l'unité de mesure sont définis par convention ou par commodité. Le « zéro » indique un degré d'intensité qui ne correspond pas, en général, à une absence totale ou à une intensité nulle du caractère. Exemple : Quand est mesurée la température, la valeur « zéro » ne veut pas dire absence totale de chaleur. Il est possible d'utiliser des unités de mesure comme, C ou F.
g	Les chiffres utilisés pour identifier ou classer le paramètre ont une valeur quantitative (Baillargeon, 1993).			X	X	Les chiffres de l'échelle ont une valeur quantitative. Exemple : Pour mesurer le temps en heures, la valeur 9 :00, indique 9 heures.
h	Est permis de calculer les rapports des valeurs de l'échelle (Stevens, 1946).				X	L'échelle permet de calculer le rapport des valeurs. Exemple : afin de connaître le nombre d'incidents dans une entreprise ; la question suivante est posée : Combien d'incidents avez-vous eu dans votre travail ? La personne qui a répondu 4 a eu 2 fois plus d'incidents que celui qui a eu 2.
i	L'unité de mesure et le point zéro ne sont pas fixés par convention (Stevens, 1946).				X	Dans l'échelle le point zéro et l'unité de mesure sont définis pour indiquer qu'il y a une absence totale du caractère. Exemple : pour mesurer « nombre d'enquêtes d'accidents de travail dans une école », l'unité de mesure est « enquête » et le point « zéro » indique qu'il n'y a pas eu d'enquêtes.

4.1.2 Identification des échelles d'attitude

Pour déterminer le type d'échelle d'attitude utilisé par les paramètres de probabilité dans les 29 outils d'estimation du risque en sécurité de machines, les caractéristiques préétablies dans la section 3.3.2 et montrées dans le tableau 13 ont été considérées.

Chaque outil a été analysé et évalué en tenant compte des caractéristiques présentées au tableau 13. Les outils qui correspondaient aux caractéristiques « a » et « b » ont été classés comme des outils qui utilisent une échelle Thurstone. Les outils qui correspondaient aux caractéristiques « c » et « d » ont été classés comme des outils qui utilisent une échelle de Likert. Les outils qui correspondaient aux caractéristiques « e » et « f » ont été classés comme des outils qui utilisent une échelle Guttman. Les outils qui correspondaient à la caractéristique « g » ont été classés comme des outils qui utilisent une échelle sémantique différentielle. Les outils qui correspondaient à la caractéristique « h » ont été classés comme des outils qui utilisent une échelle visuelle analogue.

Tableau 13 : Caractéristiques pour la classification des outils selon les échelles d'attitude

	Caractéristique	Échelle d'attitude					Critères de décision
		Thurstone	Likert	Guttman	Sémantique	Visuelle	
a	Les questionnaires présentent des items dichotomiques, ayant chacun une cote, auxquels les sujets sont priés de répondre en manifestant leur approbation ou leur désapprobation (Alexandre, 1971).	x					L'échelle présente des items dichotomiques, auxquels les personnes répondent en manifestant leur approbation ou leur désapprobation. Exemple, Pour connaître l'attitude vers la sécurité au travail. Il est demandé de répondre, d'accord ou pas d'accord, à l'énoncé suivant : La sécurité au travail est une façon de prévenir les accidents ?
b	L'attitude est définie comme un continuum psychique de sorte que l'accord, le désaccord ou même l'indifférence font partie du même ensemble (Alexandre, 1971).	x					L'échelle définit l'attitude comme un continuum psychique. Exemple : Pour connaître l'attitude vers la sécurité au travail, l'échelle suivante est définie. <div style="text-align: center;"> 1 2 3 4 5 6 7 D'accord Neutre Pas d'accord </div>
c	Les questionnaires présentent un certain nombre de phrases sélectionnées sur une échelle de degrés tout à fait d'accord, d'accord, ni en désaccord ni d'accord, pas d'accord, pas du tout d'accord (Macar, 1974).		x				L'échelle situe un certain nombre de phrases sur une échelle de degrés tout à fait d'accord, d'accord, ni en désaccord ni d'accord, pas d'accord, pas du tout d'accord. Exemple : Pour connaître l'attitude vers la sécurité au travail, l'énoncé suivant est formulé : La sécurité au travail est une façon de prévenir les accidents ? a- Tout à fait d'accord b- D'accord c- Ni en désaccord ni d'accord d- Pas d'accord e- Pas du tout d'accord
d	Les réponses à chaque énoncé, reçoivent les valeurs scalaires les plus élevées, combien de plus sont favorables à l'attitude (Macar, 1974).		x				L'échelle donne aux items les valeurs scalaires les plus élevées, combien de plus sont favorables à l'attitude. Exemple, l'énoncé suivant est formulé : La sécurité au travail est une façon de prévenir les accidents ? a- Tout à fait d'accord (valeur scalaire =5) b- D'accord (valeur scalaire =4) c- Ni en désaccord ni d'accord (valeur scalaire =3) d- Pas d'accord (valeur scalaire =2) e- Pas du tout d'accord (valeur scalaire =1)
e	Les réponses à chaque énoncé sont classées en fonction d'une seule caractéristique ou un attribut, présentant des stimuli du plus simple au plus complexe (Alexandre, 1971).			x			L'échelle donne des items de façon hiérarchique. Exemple, La question suivante est posée : Considérez-vous la sécurité au travail comme une façon importante de prévenir les accidents ? a- Très important b- Assez important c- Pas important d- Pas important du tout e- Sans avis
f	Les items sont arrangés dans un ordre pour qu'un individu qui est d'accord avec un item particulier soit aussi d'accord avec les items d'ordre de rang inférieur (Alexandre, 1971).			x			L'échelle à des items disposés dans un ordre de sorte que celui qui accepte un item particulier est également d'accord avec les items de rang inférieur.
g	Les réponses dont les pôles sont constitués d'adjectifs qualificatifs contraires lesquels sont séparés par 5 ou 7 échelons qui sont autant de degrés intermédiaires alignés sur un continuum allant d'un pôle à l'autre (Macar, 1974).				x		L'échelle utilise une série d'échelles de réponses bipolaires à l'aide desquelles un concept ou un objet est évalué. Exemple, La question suivante est posée : Comme considérez-vous la sécurité au travail ? Nécessaire Inutile
h	Les répondants précisent leur niveau d'accord sur une déclaration indiquant une position le long d'une ligne continue entre deux points d'extrémité (Couper, 2006).					x	L'échelle visuelle analogue est habituellement une ligne horizontale de 100 mm de longueur, ancrée par mots descripteurs à chaque extrémité. Exemple : Impossible certain

4.2 Élaboration des alternatives

Dans le but de créer un outil d'expérimentation pour évaluer les impacts que peut avoir la manière dont est défini le paramètre de probabilité du dommage dans les outils d'estimation du risque en sécurité des machines, 10 alternatives ont été structurées. Les alternatives proposant différentes manières de définir le paramètre de probabilité du dommage ont été élaborées en tenant compte des définitions présentées dans l'étude de Moulet (2009), des avantages et des inconvénients des différents types d'échelles de mesure et des échelles de mesure présentées dans la norme ISO 12100 (2010).

Afin de simplifier la procédure expérimentale pour l'élaboration des alternatives, seul le paramètre de « probabilité d'occurrence du dommage » a été considéré. Celui-ci est fonction de l'exposition de la ou des personnes au phénomène dangereux, de l'occurrence d'un événement dangereux et des possibilités techniques et humaines d'éviter ou de limiter le dommage.

Les échelles d'attitude de Thurstone, Likert, Guttman et Sémantique différentielle n'ont pas été considérées parce qu'aucun des 29 outils d'estimation du risque répertoriés n'utilisaient une telle échelle, comme il en sera question à la section 5.1. Ces échelles sont par ailleurs longues et couteuses à construire. Dans les échelles de base, l'échelle ordinale et l'échelle de rapport ont été retenues. L'échelle ordinale a été choisie parce qu'elle est facile à construire et est présente dans tous les outils (d'estimation du risque) analysés. L'échelle de rapport a été choisie parce que c'est une nouvelle façon de mesurer l'estimation du risque et est facile à construire. L'échelle visuelle analogue et les items de type Likert ont été choisis parce qu'ils sont faciles à construire, faciles à répondre et ont un haut niveau de fiabilité et de validité.

La définition du paramètre a été inspirée en considérant certaines échelles de mesure utilisées dans les outils d'estimation du risque répertoriés. Ces échelles ont parfois été ajustées en tenant compte des variables à mesurer dans le contexte de la présente étude. Des échelles qui ne sont pas utilisées par les outils d'estimation du risque ont également été considérées. Pour les échelles de base, les nombres de niveaux ont été définis à 3 et 5, tenant compte du profil de l'outil type présenté dans l'étude de Moulet (2009).

Les sections suivantes présentent les 10 alternatives élaborées.

4.2.1 Alternatives A et B

La construction des alternatives A et B a été inspirée d'une échelle de mesure présentée dans la norme ISO 12100 (2010) et sur des échelles de mesure utilisées par les outils d'estimation du risque numéros 1, 33, 34, 102, 19, 24, 89 et 114 dans l'étude de Moulet (2009). Le paramètre a été défini de façon qualitative simple, en utilisant une échelle ordinale de trois niveaux. Pour l'alternative A, les niveaux utilisés ont été définis de la façon suivante :

- 1- Rare
- 2- Possible
- 3- Très probable

Pour l'alternative B, le paramètre a été défini de façon qualitative détaillée, en utilisant une échelle ordinale de trois niveaux. Les niveaux utilisés ont été définis de la façon suivante :

- 1- Rare : très improbable car près de zéro
- 2- Possible : pourrait survenir
- 3- Très probable : presque certain de se produire, surviendra vraisemblablement dans la plupart des circonstances

4.2.2 Alternatives C et D

La construction des alternatives C et D a été inspirée des échelles utilisées par des outils d'estimation du risque numéros 10, 44, 85 et 17 dans l'étude de Moulet (2009). Pour l'alternative C, le paramètre a été défini de façon quantitative détaillée en utilisant une échelle ordinale de trois niveaux. Les niveaux utilisés ont été définis de la façon suivante :

- 1- Une probabilité de 1 fois par 100 ans
- 2- Une probabilité de 1 fois par 25 ans
- 3- Une probabilité de 1 fois par 5 ans

Pour l'alternative D, le paramètre a été défini de façon quantitative détaillée en utilisant une échelle ordinale de cinq niveaux. Les niveaux utilisés ont été définis de la façon suivante :

- 1- Une probabilité de 1 fois par 100 ans
- 2- Une probabilité de 1 fois par 50 ans
- 3- Une probabilité de 1 fois par 25 ans
- 4- Une probabilité de 1 fois par 10 ans
- 5- Une probabilité de 1 fois par 5 ans

4.2.3 Alternatives E et F

La construction des alternatives E et F a été inspirée des échelles utilisées par les outils d'estimation du risque numéros 48, 6, 7, 35, 45, 66, 94, 57 et 41 dans l'étude de Moulet (2009) et sur une échelle de mesure présentée dans la norme ISO 12100. Le paramètre a été défini de façon qualitative simple, en utilisant une échelle ordinale de cinq niveaux. Pour l'alternative E, les niveaux utilisés ont été définis de la façon suivante :

- 1- Rare
- 2- Improbable
- 3- Possible
- 4- Probable
- 5- Très probable

Pour l'alternative F, le paramètre a été défini de façon qualitative détaillée en utilisant une échelle ordinale de cinq niveaux. Les niveaux utilisés ont été définis de la façon suivante :

- 1- Rare : très improbable car près de zéro
- 2- Improbable : occurrence possible, mais non anticipée
- 3- Possible : pourrait survenir
- 4- Probable : peut se produire, surviendra probablement dans la plupart des circonstances
- 5- Très probable : presque certain de se produire, surviendra vraisemblablement dans la plupart des circonstances

4.2.4 Alternative G

La construction de cette alternative a été inspirée des échelles utilisées par des outils d'estimation du risque numéros 10, 44, 85 et 17 dans l'étude de Moulet (2009). Le paramètre a été défini de façon quantitative simple, en utilisant une échelle ordinale de cinq niveaux. Les niveaux utilisés ont été définis de la façon suivante :

- 1- 1×10^{-2} par an.
- 2- 2×10^{-2} par an
- 3- 4×10^{-2} par an
- 4- 1×10^{-1} par an
- 5- 2×10^{-1} par an

4.2.5 Alternative H

L'alternative a été élaborée en tenant compte des items de type Likert avec cinq niveaux. Il est demandé d'estimer la probabilité d'occurrence d'une blessure au travailleur, en tenant compte l'affirmation suivante :

- a- En considérant une utilisation de cette machine durant les 5 prochaines années, la probabilité qu'un travailleur subisse cette blessure, est élevée.

- 1- Pas du tout d'accord
- 2- Pas d'accord
- 3- Ni en désaccord ni d'accord
- 4- D'accord
- 5- Tout à fait d'accord

4.2.6 Alternative I

Pour cette alternative une échelle de rapport (échelle de probabilité de 0% à 100%) a été utilisée. Il est demandé d'estimer la probabilité d'occurrence d'une blessure au travailleur, en tenant compte d'un scénario particulier.

- a- En considérant une utilisation de cette machine durant les 5 prochaines années, quelle serait, à votre avis, la probabilité en % qu'un travailleur subisse cette blessure ?

4.2.7 Alternative J

Cette alternative a été construite en utilisant une échelle de classement continu (échelle visuelle analogue). L'échelle est une ligne qui a, sur un extrême, le mot « impossible » et sur l'extrême opposé le mot « certain ». Sur l'échelle est mesurée la probabilité d'occurrence d'une blessure au travailleur, en divisant la ligne en 100 mm.

- a- En considérant une utilisation de cette machine durant les 5 prochaines années, quelle serait à votre avis la probabilité qu'un travailleur subisse cette blessure ? Placez un « X » à l'endroit choisi.

Impossible ----- Certain

Le tableau 14 résumé les différentes alternatives proposées pour définir le paramètre de probabilité du dommage utilisées dans la présente étude.

Tableau 14 : Alternatives pour définir le paramètre de probabilité du dommage

Alternative	Échelle	Définition	Niveaux
A	Ordinale	Qualitative simple	3
B		Qualitative détaillée	
C		Quantitative détaillée	
D		Quantitative détaillée	5
E		Qualitative simple	
F		Qualitative détaillée	
G		Quantitative simple	
H	Items type Likert	Qualitative simple	
I	Rapport	Quantitative simple	0 à 100
J	Visuelle Analogue	Qualitative simple	0 à 10

4.3 Étude expérimentale

Dans l'étude expérimentale, les 10 alternatives élaborées ont été appliquées pour estimer la probabilité du dommage de 4 scénarios accidentels.

Pour chacun de ces scénarios, un niveau de probabilité de référence de l'estimation du dommage a été établi. Ce niveau de probabilité a été utilisé pour comparer les résultats de l'estimation de la probabilité du dommage durant l'expérimentation. Un outil d'expérimentation a été utilisé pour colliger les informations en ce qui concerne la variabilité de l'estimation de la probabilité et la facilité à choisir un niveau de l'échelle des paramètres de probabilité.

4.3.1 Élaboration des scénarios accidentels

Les scénarios ont été élaborés dans le but d'avoir des situations de référence pour réaliser l'estimation de la probabilité d'occurrence du dommage.

Pour l'élaboration des scénarios, des activités avec des machines simples et assez bien connues de tout ingénieur ont été choisies. Pour chaque scénario, la fréquence et temps d'exposition du travailleur, la formation reçue pour faire la tâche, l'expérience dans la réalisation de la tâche, le phénomène dangereux, la situation dangereuse, l'évènement dangereux et le dommage possible ont été décrits.

Quatre scénarios ont été élaborés, dont (1) un scénario avec une perceuse à colonne utilisée dans un atelier d'une université, (2) un scénario avec une presse plieuse hydraulique avec une commande au pied utilisé dans une usine de fabrication des portes, (3) un scénario avec un tour conventionnel utilisé dans un atelier de fabrication mécanique et (4) un scénario avec une trancheuse à viande utilisée dans une boucherie de supermarché.

Dans chaque scénario, une image de la machine et un texte descriptif d'une activité particulière ont été présentés. La description de l'activité incluait les paramètres nommés précédemment et était associée à l'image de la machine. Ces scénarios sont présentés à l'annexe 2.

4.3.2 Établissement du niveau de probabilité de référence

Dans le but d'avoir un point de référence de l'estimation de la probabilité du dommage pour chaque scénario, un niveau de probabilité de référence a été établi. Pour établir ce niveau de probabilité de référence, la méthode Delphi (Booto Ekionea, 2011) a été utilisée. Cette méthode consiste en premier lieu, à choisir des experts dans le domaine de la sécurité industrielle. En utilisant les références de personnes connues dans le réseau professionnel, un groupe composé de 8 experts en sécurité de machines a été recruté. Les experts provenaient de l'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail, de Polytechnique de Montréal, de l'Université du Québec à Trois-Rivières et d'une entreprise privée.

La procédure pour établir le niveau de probabilité de référence a été la suivante :

1. Faire une liste d'experts potentiels, en utilisant les références de personnes connues dans le réseau professionnel des chercheurs et des professeurs.
2. Réaliser un premier contact avec les experts potentiels par courriel ou par téléphone. Expliquer l'objectif de la recherche et le travail à effectuer.
3. Vérifier si le candidat est un ingénieur diplômé expert dans le domaine de la sécurité et l'hygiène industrielle.
4. Premier tour. Envoyer la lettre de consentement avec la description de la recherche et l'outil pour définir les probabilités de référence.
5. Recevoir tous les documents remplis et faire l'analyse statistique.
6. Deuxième tour. Envoyer une deuxième fois l'outil pour définir les probabilités de référence avec les résultats de la moyenne de l'estimation de la probabilité.

7. Recevoir tous les documents remplis et faire l'analyse statistique.
8. Déterminer les niveaux de probabilité de référence pour chaque scénario.

Toutes les étapes de cette partie ont été faites par téléphone et/ou par courriel.

Pour l'établissement des probabilités de référence, une échelle visuelle analogue a été utilisée. Les scénarios avec les questions à chaque expert a été envoyé. Ensuite, une analyse statistique des réponses des experts a été réalisée. Par la suite et pour réduire les positions contradictoires, il a été demandé aux experts de réviser leurs positions, de fournir une nouvelle réponse et de se justifier. Les résultats obtenus ont été analysés et les valeurs extrêmes (les plus hautes et les plus basses) par rapport à la moyenne n'ont pas été retenues. Les probabilités de référence ont été établies en considérant la moyenne des données finales dans chaque scénario.

Les documents utilisés pour établir les probabilités de référence sont présentés à l'annexe 3.

4.3.3 Élaboration et validation de l'outil d'expérimentation

Un outil d'expérimentation a été élaboré avec l'objectif de colliger les informations en ce qui concerne la variabilité de l'estimation de la probabilité d'occurrence du dommage et la facilité à choisir un niveau de l'échelle du paramètre de probabilité. L'outil a été créé sur la plateforme *Survey Monkey*. L'annexe 4 présente un aperçu de l'interface.

L'outil présente quatre scénarios avec des images et un texte descriptif et pour lequel il est demandé aux sujets d'estimer la probabilité d'occurrence de blessures au travailleur. Pour l'estimation, les 10 alternatives présentées à la section 4.2 ont été utilisés. Aussi, il a été demandé de définir le degré de difficulté trouvée pour choisir un niveau dans l'échelle du paramètre et d'expliquer le choix.

La validation de l'outil a été réalisée en utilisant la stratégie de validation du contenu. Dans cette étape, l'outil a été appliqué à six candidats potentiels à qui il a été demandé de valider le contenu de l'outil. Les principales suggestions lors de cette validation ont été sur la description de chaque scénario et sur le type de questions utilisées. Des améliorations ont été appliquées à l'outil d'expérimentation.

4.3.4 Application de l'outil d'expérimentation

L'outil d'expérimentation a été appliqué par 37 ingénieurs diplômés venant de différents domaines. Ces ingénieurs ont été recrutés en utilisant les références de personnes connues dans le réseau professionnel des chercheurs, des professeurs et des étudiants de l'école d'ingénierie de l'UQTR.

L'application de l'outil d'expérimentation a été réalisée dans un lieu prévu pour les candidats et le chercheur. Ce lieu disposait d'un ordinateur avec connexion internet. L'outil d'expérimentation a été rempli une partie sur internet en utilisant la plateforme *Survey Monkey* et une autre partie sur papier (l'échelle visuelle analogue). Afin de s'assurer que les participants cheminaient aisément avec l'outil d'expérimentation, ils étaient accompagnés en tout temps par le chercheur. Chaque participant a fait un total de 40 estimations (4 scénarios X 10 alternatives). La durée approximative de l'expérimentation était de 1h.

La procédure de l'expérimentation était la suivante :

1. Faire une liste des participants potentiels pour l'expérimentation, en utilisant les références de personnes connues dans le réseau professionnel des chercheurs, des professeurs et des étudiants des cycles supérieurs.
2. Réaliser un premier contact avec les participants potentiels en utilisant le courriel, téléphone ou un rendez-vous. Expliquer l'objectif de la recherche et le travail à effectuer.
3. Vérifier si le participant est un ingénieur diplômé (demander au participant s'il a un diplôme d'ingénieur).
4. Déterminer la disponibilité du participant pour l'expérimentation.
5. Définir l'endroit, la date et l'heure pour l'expérimentation.
6. Envoyer la lettre de consentement avec la description de la recherche, les scénarios et un questionnaire modèle.
7. Planifier et organiser l'expérimentation (logistique, ordinateur, accès à internet, scénarios sur papier, local).
8. Téléphoner ou envoyer un message courriel deux jours avant l'expérimentation pour confirmer la disponibilité.
9. Le jour de l'expérimentation : expliquer l'objectif de la recherche, les scénarios, le questionnaire, les échelles de mesure, la lettre de consentement et répondre aux questions sur l'expérimentation. Faire signer la lettre de consentement.

10. Vérifier que l'outil est rempli en totalité.

Les documents utilisés pour l'expérimentation sont présentés à l'annexe 5.

4.3.5 Analyse de résultats

Toutes les données ont été vérifiées pour s'assurer de leur cohérence et de leur validité. Sur un total de 37 sujets qui ont participé à l'expérimentation, les données de deux sujets n'ont pas été retenues par manque de cohérence et de validité (les réponses ont été placées dans la même grille partout dans l'outil).

Les alternatives ont été codées selon le nombre de niveaux. Pour les alternatives à trois niveaux les codes sont de 1 à 3, où « 1 » représente une probabilité faible et « 3 » une probabilité élevée. Pour les alternatives à cinq niveaux les codes sont de 1 à 5, où « 1 » représente une probabilité faible et « 5 » une probabilité élevée. Pour les scénarios, les codes suivantes ont été utilisés : S1 = scénario 1; S2 = scénario 2; S3 = scénario 3 et S4 = scénario 4.

En tenant compte que les alternatives I (échelle de rapport) et J (échelle visuelle analogue) ont une grande plage de réponses, les données de ces alternatives ont été regroupées en cinq niveaux. Le premier niveau (1) regroupe les données de 1 à 20; le deuxième niveau (2) regroupe les données de 21 à 40; le troisième niveau (3) regroupe les données de 41 à 60; le quatrième niveau (4) regroupe les données de 61 à 80 et le cinquième niveau (5) regroupe les données de 81 à 100.

L'analyse des résultats de l'expérimentation a débuté par l'analyse de chaque alternative dans les quatre scénarios. Dans cette étape, l'analyse de la variabilité de l'estimation de la probabilité a été réalisée, en utilisant la variance, la moyenne pondérée, l'écart avec la probabilité de référence et des graphes de dispersion. Pour l'analyse de la facilité, le pourcentage modal et des histogrammes ont été utilisés. Dans cette analyse, le terme « facile » inclue les valeurs des données « assez facile et très facile » et le terme « difficile » inclue les valeurs des données « assez difficile et très difficile ».

Puis une analyse globale des résultats expérimentaux a été réalisée. Pour cette analyse l'écart moyen global (l'écart entre la moyenne pondérée des estimations de probabilité et la probabilité de référence), la variance moyenne globale et le pourcentage de difficulté moyen global (pour choisir un niveau de l'échelle des paramètres de probabilité) ont été considérés.

L'analyse a débuté par les alternatives à 3 niveaux, suivie par les alternatives à 5 niveaux et par une analyse comparative des alternatives.

Les probabilités de référence obtenues avec la méthode Delphi a été utilisée pour déterminer la justesse des résultats obtenus par les sujets avec les différentes alternatives de paramètres de probabilité.

5 RÉSULTATS

5.1 Identification des types d'échelles utilisés dans les paramètres de probabilité

5.1.1 Paramètre de probabilité d'occurrence du dommage

L'analyse réalisée à partir des trois critères présentés à la section 4.1 montre que pour définir le paramètre de probabilité d'occurrence du dommage, tous les outils d'estimation du risque étudiés utilisent une échelle de base ordinale. Le tableau 15, montre le résumé des échelles de base identifiées dans les outils d'estimation du risque en sécurité de machines.

Tableau 15 : Échelles de base identifiées – paramètre de probabilité d'occurrence du dommage

Caractéristiques pour la classification des outils selon les échelles de base (voir tableau 12)										Échelle
Outil	a	b	c	d	e	f	g	h	i	
1	x	x	x							Ordinale
3	x	x	x							Ordinale
6	x	x	x							Ordinale
7	x	x	x							Ordinale
10	x	x	x		x		x		x	Ordinale
24	x	x	x							Ordinale
33	x	x	x							Ordinale
34	x	x	x							Ordinale
35	x	x	x							Ordinale
41	x	x	x							Ordinale
44	x	x	x						x	Ordinale
45	x	x	x							Ordinale
46	x	x	x							Ordinale
48	x	x	x							Ordinale
58	x	x	x							Ordinale
66	x	x	x							Ordinale
85	x	x	x		x		x		x	Ordinale
89	x	x	x							Ordinale
94	x	x	x							Ordinale
102	x	x	x							Ordinale
114	x	x	x							Ordinale

Les outils 1, 7, 33 et 94 (tableau 16) utilisent une échelle qui permet de différencier et d'établir une relation d'ordre entre les niveaux, mais ne permet pas de mesurer la distance entre chaque niveau. Ces outils définissent les niveaux de l'échelle de façon qualitative, en utilisant seulement des adjectifs, lesquels peuvent être interprétés de plusieurs façons, dépendamment de la personne qui fait l'estimation.

Tableau 16 : Outils 1, 7, 33, 94

Outil #	Niveaux	Type d'échelle	Définition des niveaux
1	<ol style="list-style-type: none"> 1. Low – unlikely 2. Medium – possible 3. High – probable 	Ordinale	Qualitative simple
7	<ul style="list-style-type: none"> • Remote • Improbable • Possible • Probable • Likely 		
33	<ul style="list-style-type: none"> • Not likely, but possible • Likely • Very likely 		
94	<ul style="list-style-type: none"> • Improbable • Remote • Occasional • Probable • Frequent 		

Les outils 3, 6, 24, 34, 35, 41, 45, 46, 48, 58, 66, 89, 102 et 114 (tableau 17) définissent les niveaux de l'échelle de façon qualitative en utilisant des adjectifs, des mots et des explications qui peuvent avoir différentes interprétations. L'échelle utilisée par ces outils permet de différencier et d'établir une relation d'ordre entre les niveaux, mais ne permet pas de mesurer l'écart entre chaque niveau.

L'outil 34 utilise les mots « *very seldom* » pour définir le niveau « *low* », l'outil 102 utilise les mots « *very small chance* » pour définir le niveau « *unlikely* », l'outil 6 utilise les mots « *will occur several times* » pour définir le niveau « *probable* ». Les niveaux de l'échelle peuvent être différenciés et ordonnés, mais il n'est pas possible de mesurer la distance entre chaque niveau. L'outil 102 emploie des chiffres qui n'ont pas une valeur quantitative. Les niveaux sont définis avec des adjectifs en tenant compte de la probabilité d'occurrence d'un accident. L'outil 114 définit les niveaux de l'échelle et donnent des informations reliées à la fréquence d'exposition. Les niveaux de l'échelle de l'outil 3 ne sont pas définis de la même façon. Le niveau « *very unlikely* » est défini avec une valeur de probabilité, le niveau « *unlikely* » est

défini avec une fréquence par vie d'employé, le niveau « *likely* » est défini avec une fréquence par année et le niveau « *very likely* » est défini avec une fréquence par mois.

Tableau 17 : Outils 3, 6, 24, 34, 35, 41, 45, 46, 48, 58, 66, 89, 102 et 114

Outil #	Niveaux	Type d'échelle	Définition des niveaux
3	<ul style="list-style-type: none"> Very Unlikely - Less than 1% chance of being experienced by an individual during their working lifetime. Unlikely - Typically experienced once during the working lifetime of an individual. Likely - Typically experienced once every five years by an individual. Very likely - Typically experienced at least once every six months by an individual. 	Ordinale	Qualitative détaillée
6	<ul style="list-style-type: none"> Impossible - so unlikely that probability is close to zero. Remote - unlikely, though conceivable. Possible - could occur sometime. Probable - not surprised, will occur several times Likely/frequent - occurs repeatedly/event only to be expected. 		
24	<ul style="list-style-type: none"> Remote - so unlikely as to be near zero. Unlikely - not likely to occur. Likely - may occur. Very likely - near certain to occur. 		
34	<ul style="list-style-type: none"> Low - very seldom or never occurs Medium - reasonably likely to occur High - certain or near certain to occur 		
35	<ul style="list-style-type: none"> E: Rare - occurs only in exceptional circumstances. D: Unlikely - could occur but not expected. C: Possible - could occur. B: Likely - will probably occur in most circumstances. A: Almost certain - is expected to occur in most circumstances. 		
41	<ul style="list-style-type: none"> F: Highly improbable - probability cannot be distinguished from zero. E: Improbable - very unlikely to occur in the life cycle. D: Remote - unlikely but may possibly occur in the life cycle. C: Occasional - likely to occur at least once in the life cycle. B: Probable - likely to occur several times in the life cycle. A: Highly probable - likely to occur frequently in the life cycle. 		
45	<ul style="list-style-type: none"> E: Unlikely - can assume will not occur, but not impossible. D: Seldom - remotely possible, could occur at some time. C: Occasional - occurs sporadically. B: Likely - occurs several times. A: Frequent - occurs very often, continuously experienced. 		
46	<ul style="list-style-type: none"> Sub category D - unlikely to occur. Sub category C - may occur in time. Can reasonably be expected to occur sometime to an individual item or person or several times to a fleet, inventory or group. Sub category B - probability will occur in time. Expected to occur several times to an individual item or person or frequently to a fleet, inventory or group. Sub category A - likely to occur immediately or within a short period of time. Expected to occur frequently to an individual item or person or continuously to a fleet, inventory or group. 		
48	<ul style="list-style-type: none"> E: Rare - Occurs only in exceptional circumstances. D: Unlikely - could occur but not expected. C: Possible - could occur. B: Likely - Will probably occur in most circumstances. A: Almost certain - Is expected to occur in most circumstances. 		
58	<ul style="list-style-type: none"> Peu plausible : très peu probable : aucun membre de l'équipe n'a jamais entendu parler d'un tel événement dans l'industrie. Improbable : peu probable mais peut exceptionnellement se produire : un membre de l'équipe connaît quelqu'un à qui cet événement est arrivé. Occasionnel : peut parfois se produire : l'événement est arrivé à un membre de l'équipe au cours des deux dernières années. Probable : peut se produire souvent : l'événement arrive à tous les membres de l'équipe au moins une fois par année. Fréquent : occurrence régulière ou continue : l'événement arrive souvent à tous les membres de l'équipe lorsqu'ils exécutent cette activité. 		
66	<ul style="list-style-type: none"> Incredible: extremely unlikely to occur. It can be assumed that the hazard may not occur. Improbable: unlikely to occur but possible. It can be assumed that the hazard may exceptionally occur. Remote: likely to occur sometime in the system life cycle. The hazard can reasonably expected to occur. Occasional: likely to occur several times, The hazard can be expected to occur several times. Probable: will occur several times. The hazard can be expected to occur often. Frequent: likely to occur frequently. The hazard will be continually experienced. 		
89	<ul style="list-style-type: none"> Very Unlikely - could happen but probably never will. Unlikely - could happen but rare. Likely - could happen occasionally. Very likely - could happen frequently. 		
102	<ol style="list-style-type: none"> Unlikely: means that there is a very small chance of the hazard causing an accident. Probable: means that there is a good chance that there is an accident. Certain: means that an accident is almost certain. 		
114	<ul style="list-style-type: none"> Remote - incidents not foreseen. Unlikely - incidents not known but feasible. Likely - incidents have occurred. Very likely - incidents almost inevitable. 		

Les outils 35 et 48 sont identiques. L'outil 41 définit les niveaux de l'échelle tenant compte de la fréquence d'occurrence par cycle de vie. Dans l'outil 66, les niveaux de l'échelle ont été définis avec des adjectifs et une explication qui fait référence à des probabilités d'occurrence. L'outil 46 définit les niveaux de l'échelle avec des mots qui ne donnent pas l'information précise pour comprendre la définition. Par exemple, « *expected to occur several times* ».

Les outils 10, 44 et 85 (tableau 18) définissent les niveaux de l'échelle de façon quantitative en utilisant des probabilités, exprimés en chiffres et avec une explication. L'échelle utilisée permet de différencier et d'établir une relation d'ordre entre les niveaux. Malgré le fait que l'échelle comporte plusieurs des caractéristiques d'une échelle de rapport, elle ne peut pas être considérée comme tel, parce qu'elle a été construite de manière ordinale.

Tableau 18 : Outils 10, 44, 85

Outil #	Niveaux	Type d'échelle	Définition des niveaux
10	<ul style="list-style-type: none"> • 1×10^{-5} per year. Once every 100,000 years. • 1×10^{-4} per year. Once every 10,000 years. • 1×10^{-3} per year. Once every 1000 years. • 1×10^{-2} per year. Once every 100 years. One in 100 chance each year, prob 0,01. • 1×10^{-1} per year. Once every ten years. One in ten chance each year, prob 0,1. 	Ordinale	Quantitative détaillée
44	<p>E: Improbable - so unlikely, it can be assumed occurrence may not be experienced, with a probability of occurrence less than 10^{-6} in that life</p> <p>D: Remote - unlikely but possible to occur in the life of an item, with a probability of occurrence less than 10^{-3} but greater than 10^{-6} in that life.</p> <p>C: Occasional - likely to occur sometime in the life of an item, with a probability of occurrence less than 10^{-2} but greater than 10^{-3} in that life.</p> <p>B: Probable - will occur several times in the life of an item, with a probability of occurrence less than 10^{-1} but greater than 10^{-2} in that life.</p> <p>A: Frequent - likely to occur often in the life of an item, with a probability of occurrence greater than 10^{-1} in that life.</p>		
85	<p>P4- not plausible (less than once per 10000 years).</p> <p>P3- never happened, but is thinkable (approx. Once in 1000 years).</p> <p>P2- almost happened, near miss (approx. Once in 100 years).</p> <p>P1- happened once (approx. Once in 10 years).</p> <p>P0- happened a couple of times (once per year or more often).</p>		

5.1.2 Paramètre de probabilité d'occurrence d'un événement dangereux

L'analyse réalisée à partir des critères présentés à la section 4.1 montre que pour définir le paramètre de probabilité d'occurrence d'un événement dangereux, tous les outils d'estimation de risque étudiés utilisent une échelle à base ordinale. Le tableau 19, montre la synthèse des échelles de base identifiées dans les outils d'estimation du risque en sécurité de machines.

Tableau 19 : Échelles de base identifiées – paramètre de probabilité d'occurrence d'un événement dangereux

Caractéristiques pour la classification des outils selon les échelles de base (voir tableau 12)										Échelle
Outil	a	b	c	d	e	f	g	h	i	
17	x	x	x							Ordinale
19	x	x	x							Ordinale
53	x	x	x							Ordinale
57	x	x	x							Ordinale
62	x	x	x							Ordinale
67	x	x	x							Ordinale
69	x	x	x							Ordinale
91	x	x	x							Ordinale

Les outils 53 et 57 (tableau 20) définissent les niveaux de l'échelle en utilisant des adjectifs qui peuvent avoir plusieurs interprétations. L'échelle utilisée par ces outils permet de différencier et d'établir une relation d'ordre entre les niveaux, mais ne permet pas de mesurer la distance entre chaque niveau.

Tableau 20 : Outils 53, 57

Outil #	Niveaux	Type d'échelle	Définition des niveaux
53	1. Faible 2. Moyen 3. Haut	Ordinale	Qualitative simple
57	1. Negligible 2. Rarely 3. Possible 4. Likely 5. Common		

Les outils 19, 62, 67, 69 et 91 (tableau 21) utilisent une échelle qui permet de différencier et d'établir une relation d'ordre entre les niveaux, mais l'échelle ne permet pas de mesurer la distance entre chaque niveau. Les niveaux de l'échelle ont été définis de façon qualitative avec des adjectifs et une explication qui peut avoir plusieurs interprétations.

Dans l'outil 91, l'explication donne des informations sur la technologie utilisée, la fréquence d'occurrence et la possibilité d'éviter du dommage. Dans l'outil 62, l'explication donne des informations sur les mesures adoptées. L'outil 67 définit les niveaux de l'échelle en utilisant

des chiffres qui n'ont pas une valeur quantitative, avec des adjectifs et une explication qui fait référence à la fiabilité des éléments et des erreurs humaines.

Tableau 21 : Outils 19, 62, 67, 69 et 91

Outil #	Niveaux	Type d'échelle	Définition des niveaux
19	<ol style="list-style-type: none"> Low - So unlikely that it can be assumed occurrence may not be experienced. Medium - Likely to occur sometime in the life of an item. High - Likely to occur frequently 	Ordinale	Qualitative détaillée
62	Po=1 : événement difficilement imaginable (mesures conformes à l'état de la technique). Po=2 : événement imaginable, mais inhabituel (mesures prises). Po=3 : l'événement est possible (mesures partiellement prises, des insuffisances évidentes). Po=4 : on peut s'attendre à ce que l'événement se produise (il y a un début de mesures). Po=5 : il faut s'attendre à ce que l'événement se produise (pas de mesures existantes).		
67	<ol style="list-style-type: none"> Negligible. E.g. this kind of component never fails so a hazardous event occurs. No possibility of human mistakes. Rarely: E.g. it is unlikely this kind of component fails so a hazardous event occurs. Human mistakes are unlikely to occur. Possible. E.g. this kind of component may fail so a hazardous event occurs. Human mistakes are possible to occur. Likely. E.g. this kind of component will probably fail so a hazardous event occurs. Human mistakes are likely to occur. Very high. E.g. this kind of component is not made for this application. It will fail so a hazardous event occurs. Human behaviour is such that the likelihood of mistakes is very high. 		
69	Low: harm will occur very seldom. Middle: harm is possible but not necessary. High: harm is mostly consequence of exposure.		
91	O1: Mature technology, proven and recognised in safety application; robustness. O2: Technical failure observed in last two years; inappropriate human action by a well trained person, aware of the risks, with more than six months experience on the work station O3: Technical failure regularly observed (every six months or less); inappropriate human action by an untrained person, with less than six months experience on the workstation; similar accident observed in the plant since ten years.		

L'outil 17 (tableau 22) définit les niveaux de l'échelle en utilisant des adjectifs et une explication avec des chiffres en termes de probabilité. L'échelle permet de différencier et d'établir une relation d'ordre entre les niveaux. Les intervalles ne sont égaux entre les niveaux de l'échelle. Les nombres utilisés pour identifier le paramètre n'ont pas une valeur quantitative, manquent d'unité de mesure. Il n'est pas possible de calculer les rapports des valeurs de l'échelle, l'échelle n'a pas un zéro absolu.

Tableau 22 : Outil 17

Outil #	Niveaux	Type d'échelle	Définition des niveaux
17	<ul style="list-style-type: none"> Extremely remote - 1 in a million. Improbable - 1 in 100 000. Prob 0,00001 Remote - 1 in 10 000. Prob 0,0001 Occasional - 1 in 1000. Prob 0,001 Probable - 1 in 100. Prob 0,01 Fréquent - 1 in 10. Prob 0,1 	Ordinale	Quantitative détaillée

5.2 Identification des structures

5.2.1 Paramètres de probabilité d'occurrence du dommage.

Pour définir le paramètre de probabilité d'occurrence du dommage, les outils d'estimation du risque ont utilisé sept types de structures (tableau 23) incluant le nombre de niveaux, les échelles de mesure et la façon de définir les niveaux. Les structures 3 et 5 sont les plus employées et ont été utilisées par un total de dix outils, correspondant à 48% ; suivi par la façon 6, qui a été utilisée par trois outils, correspondant à 14% et en dernier les façons 1, 2, 4 et 7, qui ont été employées par une total de 8 outils, correspondant à 38%.

Les niveaux du paramètre de probabilité ont été définis de façon qualitative par 86% des outils. La façon qualitative détaillée a été utilisée par 67% des outils. Le nombre de niveaux le plus utilisé dans les échelles est de 5 nombres correspondant à 47,5% des outils.

Tableau 23 : Types de structures du paramètre de probabilité d'occurrence du dommage

Structure	Nombre de Niveaux	Échelle de base	Définition des niveaux	Nombre d'outils	%
1	3	Ordinale	Qualitative simple	2	9,5
2			Qualitative détaillée	2	9,5
3	4		Qualitative détaillée	5	24
4	5		Qualitative simple	2	9,5
5			Qualitative détaillée	5	24
6			Quantitative détaillée	3	14
7	6		Qualitative détaillée	2	9,5
Total :				21	100

5.2.2 Paramètre de probabilité d'occurrence d'un événement dangereux

Pour définir le paramètre de probabilité d'occurrence d'un événement dangereux, les outils d'estimation du risque ont utilisé cinq types de structures (tableau 24), incluant le nombre de niveaux, les échelles de mesure et la façon de définir les niveaux. La structure 2, est la plus employée, (trois outils, correspondant à 37,5%), suivi par la structure 4, (deux outils, correspondant à 25%) et en dernier les structures 1, 3 et 5 (trois outils, correspondant à 37,5%). Les niveaux du paramètre de probabilité ont été définis de façon qualitative par 87,5% des outils. La façon qualitative détaillée a été utilisée par 62,5% des outils. Le nombre de niveaux plus utilisé dans les échelles est de 3 nombres, correspondant à la moitié des outils.

Tableau 24 : Types de structure du paramètre de probabilité d'occurrence d'un événement dangereux

Structure	Nombre de Niveaux	Échelle de base	Définition des niveaux	Nombre d'outils	%
1	3	Ordinale	Qualitative simple	1	12,5
2			Qualitative détaillée	3	37,5
3	5		Qualitative simple	1	12,5
4			Qualitative détaillée	2	25
5	6		Quantitative détaillée	1	12,5
Total :				8	100

En conclusion, pour définir les paramètres de probabilité, les outils d'estimation du risque ont utilisé huit structures (tableau 25) incluant le nombre de niveaux, les échelles de mesure et la façon de définir les niveaux.

Tableau 25 : Types de structures du paramètre de probabilité

Structure	Nombre de Niveaux	Échelle de base	Définition des niveaux	Nombre d'outils	%
1	3	Ordinale	Qualitative simple	3	10,3
2			Qualitative détaillée	5	17,2
3	4		Qualitative détaillée	5	17,2
4	5		Qualitative simple	3	10,3
5			Qualitative détaillée	7	24,1
6			Quantitative détaillée	3	10,3
7	6		Qualitative détaillée	2	7
8			Quantitative détaillée	1	3,4
Total :				29	100

5.3 Alternatives élaborées

Dix alternatives pour la définition du paramètre de probabilité ont été présentées à la section 4.2. Ces alternatives ont été élaborées en tenant compte des structures observées dans les outils d'estimation du risque en sécurité de machines et des nouvelles approches basées sur la revue de la littérature. Le tableau 26 résume les alternatives proposées pour définir le paramètre de probabilité.

Tableau 26 : Alternatives pour définir le paramètre de probabilité d'occurrence du dommage

Alternative	Échelle	Niveaux	Définition
A	Ordinale	1- Rare 2- Possible 3- Très probable	Qualitative simple
B	Ordinale	1- Rare : très improbable car près de zéro 2- Possible : pourrait survenir 3- Très probable : presque certain de se produire, surviendra vraisemblablement dans la plupart des Circonstances	Qualitative détaillée
C	Ordinale	1- Une probabilité de 1 fois par 100 ans 2- Une probabilité de 1 fois par 25 ans 3- Une probabilité de 1 fois par 5 ans	Quantitative détaillée
D	Ordinale	1- Une probabilité de 1 fois par 100 ans 2- Une probabilité de 1 fois par 50 ans 3- Une probabilité de 1 fois par 25 ans 4- Une probabilité de 1 fois par 10 ans 5- Une probabilité de 1 fois par 5 ans	Quantitative détaillée
E	Ordinale	1-Rare 2-Improbable 3-Possible 4-Probable 5-Très probable	Qualitative simple
F	Ordinale	1- Rare : très improbable car près de zéro 2- Improbable : occurrence possible, mais non anticipé 3- Possible : pourrait survenir 4- Probable : peut se produire, surviendra probablement dans la plupart des circonstances 5- Très probable : presque certain de se produire, surviendra vraisemblablement dans la plupart des circonstances	Qualitative détaillée
G	Ordinale	1- 1×10^{-2} par an 2- 2×10^{-2} par an 3- 4×10^{-2} par an 4- 1×10^{-1} par an 5- 2×10^{-1} par an	Quantitative simple
H	Items type Likert (ordinaire)	1-Pas du tout d'accord 2-Pas d'accord 3-Ni en désaccord ni d'accord 4-D'accord 5-Tout à fait d'accord	Qualitative simple
I	Rapport	En termes des Probabilités (valeurs entre zéro et cent)	Quantitative simple
J	Visuelle Analogue (rapport)	Valeurs entre zéro et dix	Quantitative simple

5.4 Probabilités de référence

Les probabilités de référence ont été établies à partir des résultats obtenus par un groupe d'experts, en utilisant la méthode Delphi (section 4.3.1).

Le tableau 27 montre la moyenne (en mm sur 100 mm) et l'écart type des résultats de l'estimation obtenue par le groupe d'experts dans le premier et le deuxième tour et les résultats finaux qui sont utilisés comme probabilités de référence.

Tableau 27 : Résultats de l'estimation des experts

	S1		S2		S3		S4	
	Moyenne (mm)	L'écart (mm)	Moyenne (mm)	L'écart (mm)	Moyenne (mm)	L'écart (mm)	Moyenne (mm)	L'écart (mm)
1er tour	37	22	50	23	45	34	64	19
2ième tour	37	19	50	19	34	19	65	14
Résultats finaux	33	10	52	14	34	14	69	7

Les résultats finaux ont été obtenus en retirant dans chaque cas les valeurs les plus hautes et les plus basses de la deuxième estimation. On peut observer dans les résultats finaux que l'écart type a diminué dans tous les scénarios et que la moyenne est restée semblable dans les scénarios 2 et 3, par rapport à la première et deuxième estimation.

Afin de transposer ces probabilités de référence pour les échelles à trois niveaux, les données ont été regroupées en 3 parties égales sur la base des résultats obtenus (la distance mesurée sur l'échelle visuelle analogue, en mm) dans chacun des cas. Au premier groupe est assigné le niveau 1, celui-ci regroupe les données de 1 à 33 mm sur une échelle de 100 mm; le deuxième groupe auquel est assigné le niveau 2, regroupe les données de 34 à 66 mm sur une échelle de 100 mm et le troisième groupe auquel est assigné le niveau 3, regroupe les données de 67 à 100 mm sur une échelle de 100 mm. Les probabilités de référence ont été établies en considérant la moyenne pondérée des données dans chaque scénario.

Le tableau 28 montre les résultats pour les alternatives à trois niveaux, avec le pourcentage modal, le nombre d'experts par niveau et la moyenne pondérée dans chaque scénario.

Tableau 28 : Résultats des probabilités de référence pour 3 niveaux

Niveau	Mesure (mm)	S1		S2		S3		S4	
		Nombre d'experts	%	Nombre d'experts	%	Nombre d'experts	%	Nombre d'experts	%
1	1 à 33 mm	3	50%	1	17%	3	50%	0	0%
2	34 à 66 mm	3	50%	5	83%	3	50%	2	29%
3	67 à 100 mm	0	0%	0	0%	0	0%	5	71%
Moyenne pondérée		1,50		1,83		1,50		2,71	

Pour transposer ces probabilités de référence pour les échelles à cinq niveaux, les données ont été regroupées en 5 parties égales sur la base des résultats obtenus (la distance mesurée sur l'échelle visuelle analogue, en mm) dans chaque cas. Au premier groupe est

assigné le niveau 1, celui-ci regroupe les données de 1 à 20 mm sur une échelle de 100 mm; le deuxième groupe auquel est assigné le niveau 2, regroupe les données de 21 à 40 mm sur une échelle de 100 mm; le troisième groupe auquel est assigné le niveau 3, regroupe les données de 41 à 60 mm sur une échelle de 100 mm; le quatrième groupe auquel est assigné le niveau 4, regroupe les données de 61 à 80 mm sur une échelle de 100 mm et le cinquième groupe auquel est assigné le niveau 5, regroupe les données de 81 à 100 mm sur une échelle de 100 mm.

Le tableau 29 montre les résultats finaux pour les alternatives à cinq niveaux, avec le pourcentage modal, le nombre d'experts par niveau et la moyenne pondérée dans chaque scénario.

Tableau 29 : Résultats des probabilités de référence pour 5 niveaux

Niveau	Mesure (mm)	S1		S2		S3		S4	
		Nombre d'experts	%	Nombre d'experts	%	Nombre d'experts	%	Nombre d'experts	%
1	1 à 20 mm	0	0%	0	0%	1	17%	0	0%
2	21 à 40 mm	5	83%	1	17%	2	33%	0	0%
3	41 à 60 mm	1	17%	4	67%	3	50%	1	17%
4	61 à 80 mm	0	0%	1	17%	0	0%	5	83%
5	81 à 100 mm	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%
	Moyenne pondérée	2,17		3,00		2,33		3,86	

Les probabilités de référence ont été établies en considérant la moyenne pondérée des données dans chaque scénario. Le tableau 30 montre le résumé des probabilités de référence établies pour les alternatives à 3 et 5 niveaux.

Tableau 30 : Résumé des probabilités de référence

Alternatives	Probabilités de référence			
	S1	S2	S3	S4
À 3 niveaux	1,50	1,83	1,50	2,71
À 5 niveaux	2,17	3,00	2,33	3,86

5.5 Analyse des résultats de l'expérimentation par alternative

Les résultats de l'expérimentation ont été analysés en tenant compte de la variabilité de l'estimation de la probabilité, du niveau de facilité à choisir un niveau de l'échelle des

paramètres de probabilité tel que rapporté par les sujets et de la probabilité de référence. Dans l'analyse de la facilité à choisir un niveau de l'échelle des paramètres, le terme « facile » inclue les valeurs de données « assez facile et très facile » et le terme « difficile » inclue les valeurs de données « assez difficile et très difficile ». Chaque alternative a été analysée pour chaque scénario.

5.5.1 Alternative A

Cette alternative a été définie de façon qualitative simple, en utilisant une échelle ordinale de trois niveaux.

5.5.1.1 *Analyse de la variabilité de l'estimation de la probabilité*

Le tableau 31 montre les résultats de l'estimation de la probabilité faite par les sujets dans les quatre scénarios, en utilisant l'alternative A. Cette alternative a une variance moyenne de 0,46. Dans le scénario 4, elle a la variance la plus basse des quatre scénarios avec une valeur de 0,37; dans le scénario 2, elle a la variance la plus élevée des scénarios avec une valeur de 0,53.

Tableau 31 : Statistiques de l'estimation de la probabilité - Alternative A

Niveau	Alternative A	S1		S2		S3		S4	
1	Rare	8	23%	9	26%	9	26%	2	6%
2	Possible	20	57%	17	49%	18	51%	15	43%
3	Très probable	7	20%	9	26%	8	23%	18	51%
	Variance	0,44		0,53		0,50		0,37	
	Moyenne pondérée	1,97		2,00		1,97		2,46	
	Probabilité de référence	1,50		1,83		1,50		2,71	
	Écart avec la probabilité de référence	0,47		0,17		0,47		0,25	

Dans le scénario 2, cette alternative a l'écart le plus bas entre la moyenne pondérée et la probabilité de référence. Dans les scénarios 1 et 3, elle a l'écart le plus élevé.

Les figures 3, 4, 5 et 6 montrent la dispersion des données pour les quatre scénarios. Pour le scénario 4 les données sont plus concentrées dans les niveaux 2 et 3, c'est-à-dire entre « possible et très probable ».

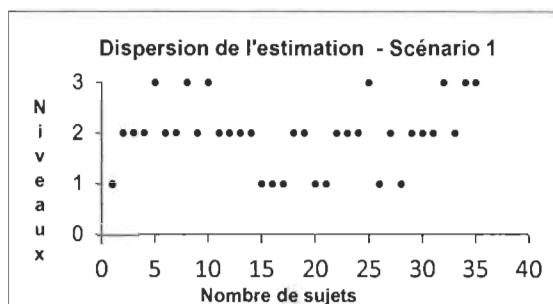


Figure 3 : Alternative A - Scénario 1

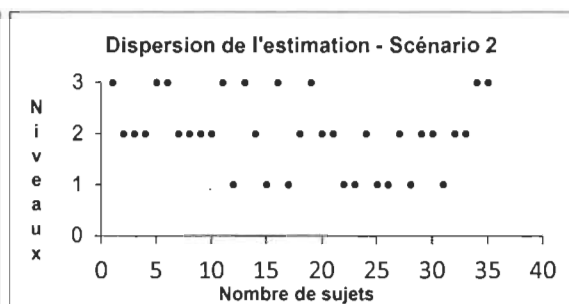


Figure 4 : Alternative A - Scénario 2

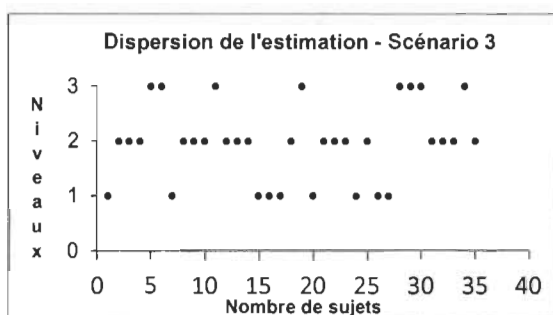


Figure 5 : Alternative A - Scénario 3

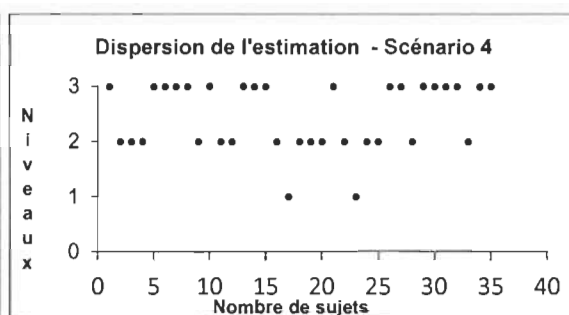


Figure 6 : Alternative A - Scénario 4

5.5.1.2 Analyse de la facilité à choisir un niveau de l'échelle des paramètres de probabilité

Plus de la moitié des sujets (65%) ont déterminé que le choix d'un niveau de l'échelle est facile et 16% ont déterminé que le choix est difficile (figure 7).

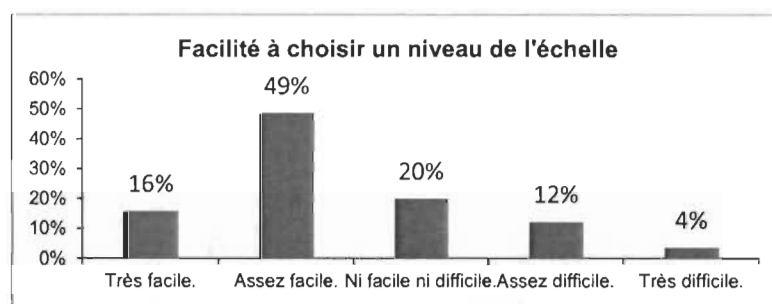


Figure 7 : Facilité à choisir un niveau de l'échelle - Alternative A

Les commentaires donnés par les sujets par rapport à la difficulté à faire un choix incitent à penser qu'il n'y avait pas suffisamment d'informations dans les énoncés de chaque niveau du paramètre pour effectuer un choix éclairé. L'échelle est considérée comme restreinte.

Voici quelques commentaires recueillis durant l'expérimentation :

- *Seulement 3 niveaux et pas de définition.*
- *Le nombre de niveaux n'était pas suffisant.*
- *Que veut dire possible ?*
- *Pas assez précis comme définition de probabilité. Pas assez adéquat.*
- *Il y a seulement trois niveaux de probabilité. Le choix est plus restreint.*
- *Revenir à seulement trois choix me complique la prise de décision.*
- *Pas assez de choix et de précision de la probabilité.*
- *Termes vagues POSSIBLE, PROBABLE, RARE, trois choix seulement et aucun exemple pour expliquer les termes.*

5.5.2 Alternative B

Cette alternative utilise une échelle ordinale de trois niveaux définis de façon qualitative détaillée.

5.5.2.1 *Analyse de la variabilité de l'estimation de la probabilité*

Le tableau 32 montre les résultats de l'estimation de la probabilité faite par les sujets dans les quatre scénarios, en utilisant l'alternative B. Cette alternative a une variance moyenne de 0,31. Dans le scénario 2, elle a la variance la plus basse des quatre scénarios avec une valeur de 0,21; dans le scénario 4, elle a la variance la plus élevée des scénarios avec une valeur de 0,39.

Tableau 32 : Statistiques de l'estimation de la probabilité - Alternative B

Niveau	Alternative B	S1		S2		S3		S4	
1	Rare : très improbable car près de zéro	6	17%	3	9%	9	26%	3	9%
2	Possible : pourrait survenir	23	66%	28	80%	24	69%	19	54%
3	Très probable : presque certain de se produire, surviendra vraisemblablement dans la plupart des circonstances	6	17%	4	11%	2	6%	13	37%
	Variance	0,35		0,21		0,28		0,39	
	Moyenne pondérée	2,00		2,03		1,80		2,29	
	Probabilité de référence	1,50		1,83		1,50		2,71	
	Écart avec la probabilité de référence	0,50		0,20		0,30		0,42	

Dans le scénario 2, cette alternative a l'écart le plus bas entre la moyenne pondérée et la probabilité de référence. Dans le scénario 1, elle a l'écart le plus élevé. Les figures 8, 9, 10,

et 11 montrent la dispersion des données pour les quatre scénarios. On peut observer dans le scénario 2, que les données sont plus concentrées dans le niveau 2 « possible ».

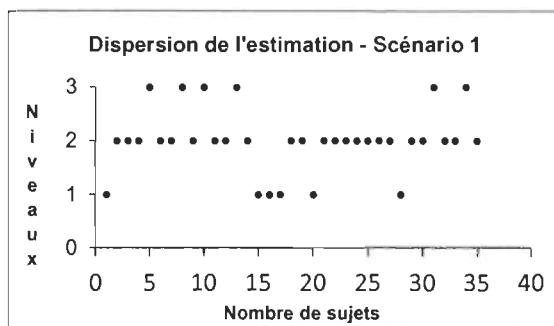


Figure 8 : Alternative B - Scénario 1

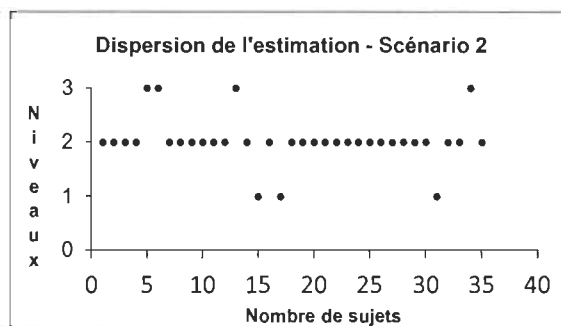


Figure 9 : Alternative B - Scénario 2

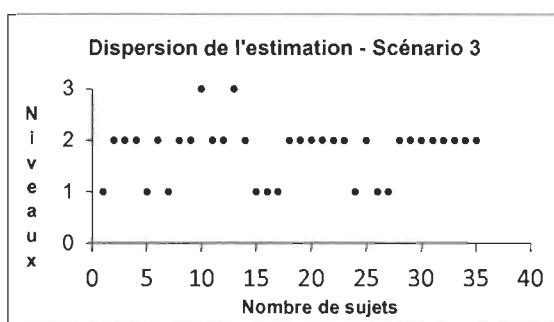


Figure 10 : Alternative B - Scénario 3

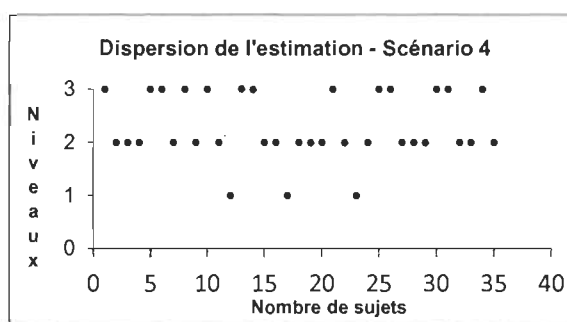


Figure 11 : Alternative B - Scénario 4

5.5.2.2 Analyse de la facilité à choisir un niveau de l'échelle des paramètres de probabilité

Pour 60% des sujets, le choix d'un niveau de l'échelle a été facile et pour 17% le choix a été difficile, comme le montre la figure 12.

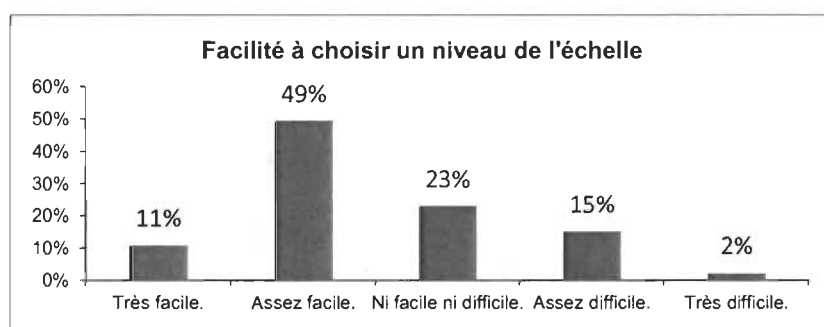


Figure 12 : Facilité à choisir un niveau de l'échelle - Alternative B

À la lecture des commentaires émis par les sujets, il semble que le nombre de niveaux inadéquat et la pauvre définition des niveaux a rendu difficile le choix d'un niveau.

Exemple de quelques commentaires :

- *3 niveaux insuffisants.*
- *Il manque des niveaux dans l'échelle.*
- *Le nombre de niveaux n'est pas adéquat.*
- *Le nombre de niveaux n'était pas suffisant.*
- *Je la trouve plutôt limitative, restreinte.*
- *Le nombre de niveaux est trop restrictif.*
- *La définition de la probabilité n'est pas claire.*
- *Laisse trop de place à l'interprétation.*
- *Termes vagues POSSIBLE, PROBABLE, RARE.*
- *La description des niveaux est vague. Des exemples aideraient à mieux situer notre cas.*
- *La définition de probabilité était peu précise.*

5.5.3 Alternative C

Cette alternative est définie de façon quantitative détaillée en utilisant une échelle ordinale de trois niveaux.

5.5.3.1 *Analyse de la variabilité de l'estimation de la probabilité*

Le tableau 33 montre les résultats de l'estimation de la probabilité faite par les sujets dans les quatre scénarios, en utilisant l'alternative C. Cette alternative a une variance moyenne de 0,27. Dans le scénario 4, elle a la variance la plus basse des quatre scénarios avec une valeur de 0,18; dans le scénario 2, elle a la variance la plus élevée des scénarios avec une valeur de 0,36.

Tableau 33 : Statistiques de l'estimation de la probabilité - Alternative C

Niveau	Alternative C	S1	S2	S3	S4
1	Une probabilité de 1 fois par 100 ans.	1 3%	2 6%	1 3%	1 3%
2	Une probabilité de 1 fois par 25 ans.	7 20%	10 29%	7 20%	3 9%
3	Une probabilité de 1 fois par 5 ans.	27 77%	23 66%	27 77%	31 89%
	Variance	0,26	0,36	0,26	0,18
	Moyenne pondérée	2,74	2,60	2,74	2,86
	Probabilité de référence	1,50	1,83	1,50	2,71
	Écart avec la probabilité de référence	1,24	0,77	1,24	0,15

Dans le scénario 4, cette alternative a l'écart le plus bas entre la moyenne pondérée et la probabilité de référence. Dans les scénarios 1 et 3, elle a l'écart le plus élevé.

Les figures 13, 14, 15 et 16 montrent la dispersion des données dans les quatre scénarios. Pour tous les scénarios les données sont plus concentrées dans le niveau 3. Le scénario 4 a la plus forte concentration dans ce niveau.

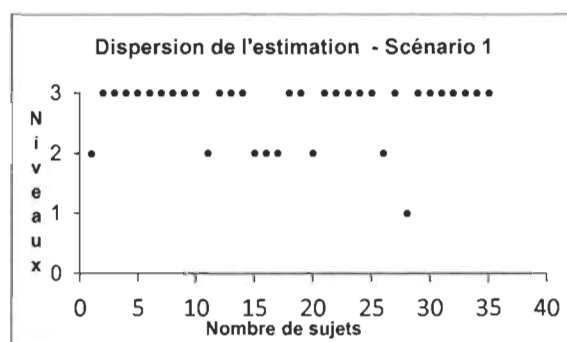


Figure 13 : Alternative C - Scénario 1

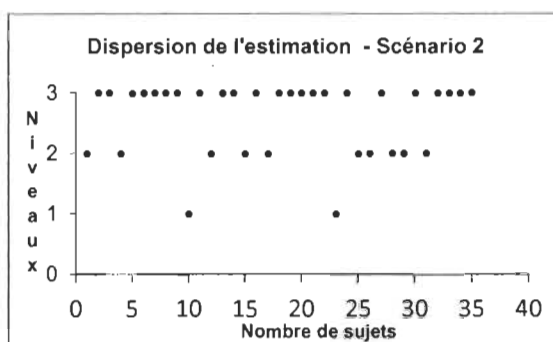


Figure 14 : Alternative C - Scénario 2

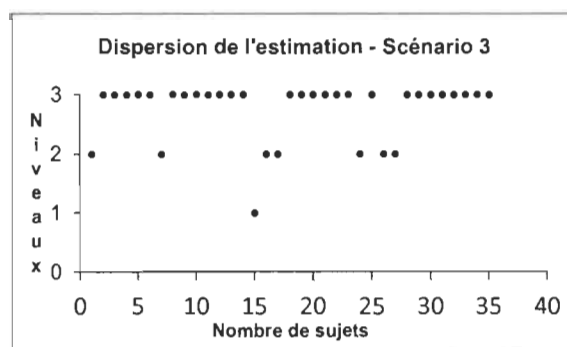


Figure 15 : Alternative C - Scénario 3

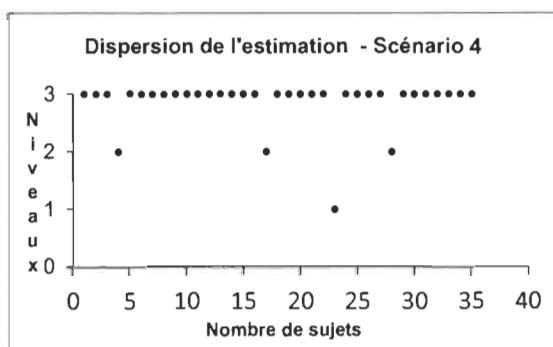


Figure 16 : Alternative C - Scénario 4

5.5.3.2 Analyse de la facilité à choisir un niveau de l'échelle des paramètres de probabilité

Comme le montre la figure 17, 60% des sujets ont déterminé que le choix d'un niveau de l'échelle est facile et 25% ont déterminé le choix comme difficile.

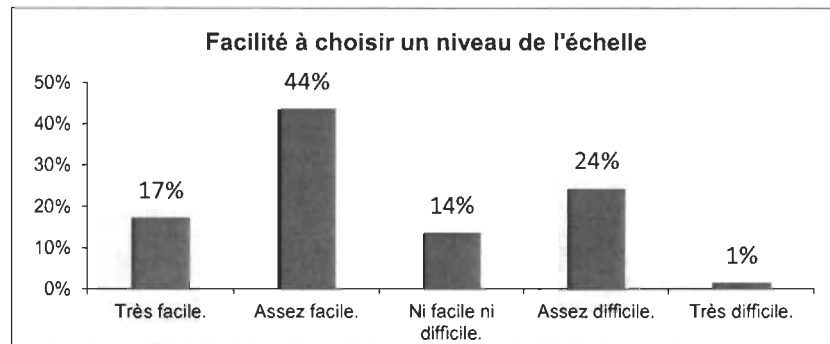


Figure 17 : Facilité à choisir un niveau de l'échelle - Alternative C

Selon les commentaires des sujets, concernant la difficulté à choisir un niveau de l'échelle, on remarque que le nombre de niveaux inadéquat et l'écart entre les niveaux font que le choix est difficile, comme le montrent les commentaires ci-dessous :

- *Le nombre de niveaux est trop restreint.*
- *Il pourrait y avoir d'autres choix intermédiaires pour répondre à cette question. Les trois niveaux (1/5), (1/25) et (1/100) sont très éloignés (cas extrêmes).*
- *L'écart entre 25 et 100 ans complique le choix.*
- *Il y a trop d'écart entre les valeurs des choix de réponse.*
- *Il manque juste d'autres niveaux.*
- *Le grand écart entre les réponses élimine naturellement deux réponses.*
- *Il manque des options de réponses pour bien se placer dans la réalité.*
- *Pas assez de niveaux et horizon trop grand.*
- *Le nombre de niveaux est trop petit.*

5.5.4 Alternative D

Cette alternative utilise une échelle ordinale de cinq niveaux définis de façon quantitative détaillée.

5.5.4.1 Analyse de la variabilité de l'estimation de la probabilité

Le tableau 34 montre les résultats de l'estimation de la probabilité faite par les sujets dans les quatre scénarios, en utilisant l'alternative D. Cette alternative a une variance moyenne de 0,95. Dans le scénario 4, elle a la variance la plus basse des quatre scénarios (0,79), dans le scénario 3, elle a la variance la plus élevée des scénarios (1,16).

Tableau 34 : Statistiques de l'estimation de la probabilité - Alternative D

Niveau	Alternative D	S1		S2		S3		S4	
1	Une probabilité de 1 fois par 100 ans.	0	0%	0	0%	1	3%	0	0%
2	Une probabilité de 1 fois par 50 ans.	3	9%	2	6%	3	9%	2	6%
3	Une probabilité de 1 fois par 25 ans.	4	11%	5	14%	1	3%	3	9%
4	Une probabilité de 1 fois par 10 ans.	8	23%	7	20%	9	26%	5	14%
5	Une probabilité de 1 fois par 5 ans.	20	57%	21	60%	21	60%	25	71%
	Variance	0,97		0,88		1,16		0,79	
	Moyenne pondérée	4,29		4,34		4,31		4,51	
	Probabilité de référence	2,17		3,00		2,33		3,85	
	Écart avec la probabilité de référence	2,12		1,34		1,98		0,66	

Dans le scénario 4, cette alternative a l'écart le plus bas entre la moyenne pondérée et la probabilité de référence. Dans le scénario 1, elle a l'écart le plus élevé. Les figures 18, 19, 20 et 21 montrent la dispersion des données dans les quatre scénarios. On observe dans le scénario 4, que les données sont plus concentrées dans le niveau 5 « une probabilité de 1 fois par 5 ans ».

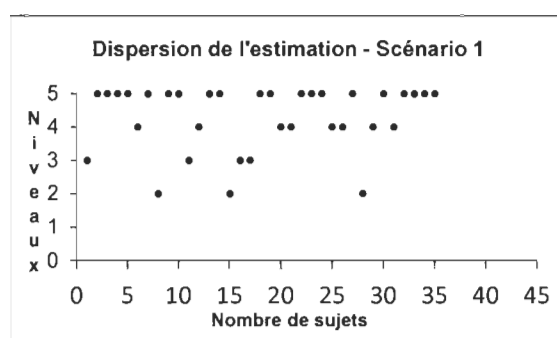


Figure 18 : Alternative D - Scénario 1

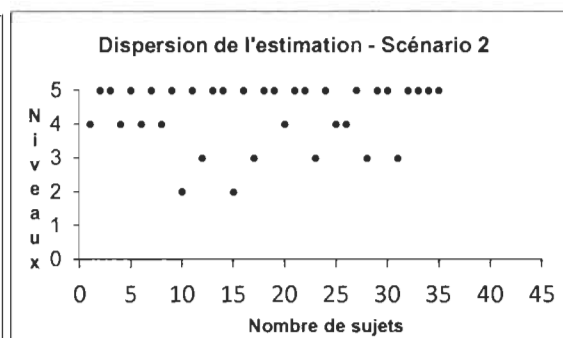


Figure 19 : Alternative D - Scénario 2

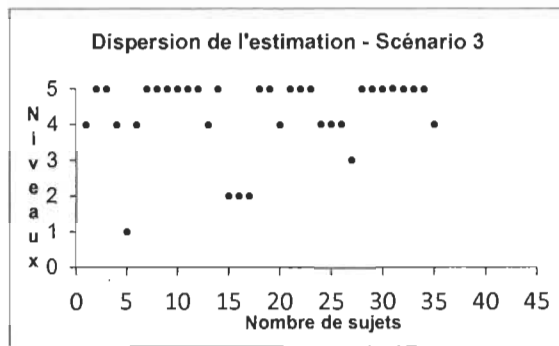


Figure 20 : Alternative D - Scénario 3

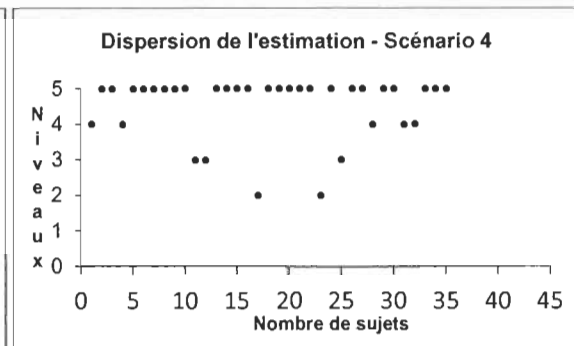


Figure 21 : Alternative D - Scénario 4

5.5.4.2 Analyse de la facilité à choisir un niveau de l'échelle des paramètres de probabilité

Pour 62% des sujets le choix d'un niveau de l'échelle a été facile et pour 21% le choix a été considéré comme difficile, comme le montre la figure 22.

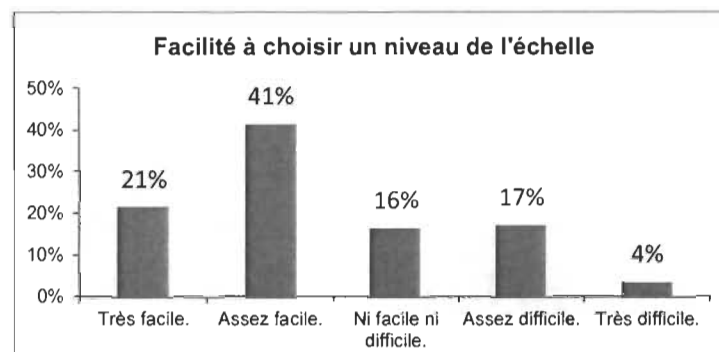


Figure 22 : Facilité à choisir un niveau de l'échelle - Alternative D

À la lecture des commentaires émis par les ingénieurs, il semble que le manque de clarté dans la définition des niveaux et l'écart entre chaque niveau a rendu difficile le choix d'un niveau. Exemple de quelques commentaires :

- La définition de la probabilité n'est pas vraiment claire.
- La probabilité pourrait être plus élevée qu'une fois par 5 ans. Je pense qu'une fois par 50 ans et une fois par 100 ans est trop faible comme probabilité.
- La répartition d'échelle n'est pas adéquate.
- Difficile de différencier 1 par 50 ans de 1 par 100 ans puisque ce sont deux gros nombres.
- Choix des probabilités trop vague.
- On dirait que l'échelle est construite pour des événements rares.

- Les différents niveaux ont un rang de temps trop grand.
- Les valeurs sont très éloignées entre elles. Il est possible que la probabilité d'accident soit plus grande que 1 fois para 5 ans.
- J'aurais mis une fois par année, une fois par deux ans.
- Les choix sont difficiles à interpréter (nécessite des notions en probabilité) et le terme "les prochaines années" porte à confusion.

5.5.5 Alternative E

Cette alternative est définie de façon qualitative simple, en utilisant une échelle ordinale de cinq niveaux.

5.5.5.1 *Analyse de la variabilité de l'estimation de la probabilité*

Le tableau 35 montre les résultats de l'estimation de la probabilité faite par les sujets dans les quatre scénarios, en utilisant l'alternative E. Cette alternative a une variance moyenne de 1,13. Dans le scénario 4, elle a la variance la plus basse des quatre scénarios avec une valeur de 0,79; dans le scénario 1, elle a la variance la plus élevée des scénarios avec une valeur de 1,50.

Tableau 35 : Statistiques de l'estimation de la probabilité - Alternative E

Niveau	Alternative E	S1	S2	S3	S4
1	Rare	4 11%	0 0%	2 6%	0 0%
2	Improbable	6 17%	7 20%	7 20%	2 6%
3	Possible	10 29%	13 37%	8 23%	7 20%
4	Probable	10 29%	10 29%	13 37%	14 40%
5	Très probable	5 14%	5 14%	5 14%	12 34%
	Variance	1,50	0,95	1,29	0,79
	Moyenne pondérée	3,17	3,37	3,34	4,03
	Probabilité de référence	2,17	3,00	2,33	3,85
	Écart avec la probabilité de référence	1,00	0,37	1,01	0,18

Dans le scénario 4, cette alternative a l'écart le plus bas entre la moyenne pondérée et la probabilité de référence. Dans les scénarios 1 et 3, elle a l'écart le plus élevé.

Les figures 23, 24, 25 et 26 montrent la dispersion des données pour les quatre scénarios. Dans le scénario 4 on observe la plus forte concentration de données dans les niveaux 3, 4 et 5.

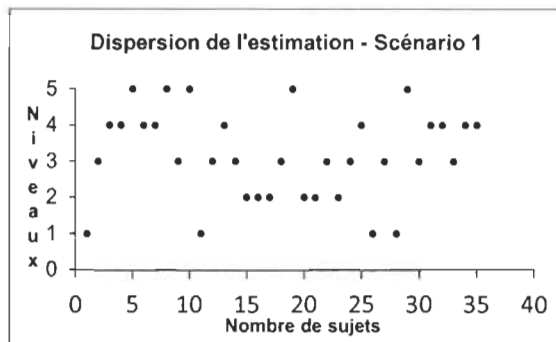


Figure 23 : Alternative E – Scénario 1

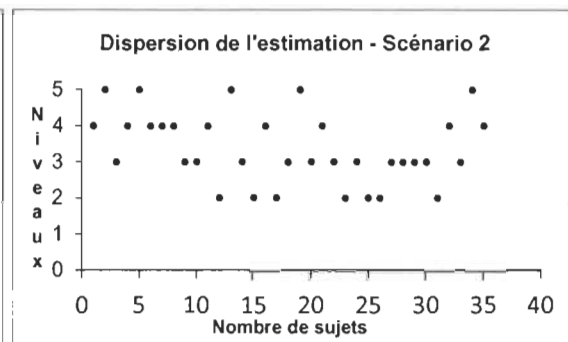


Figure 24 : Alternative E - Scénario 2

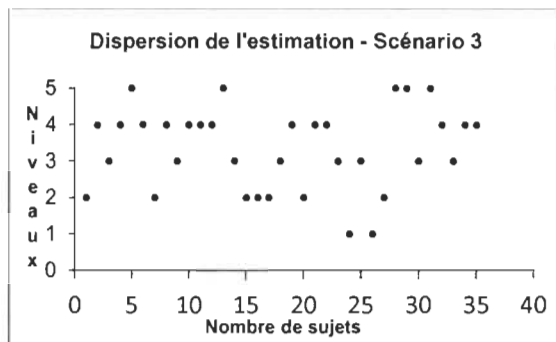


Figure 25 : Alternative E - Scénario 3

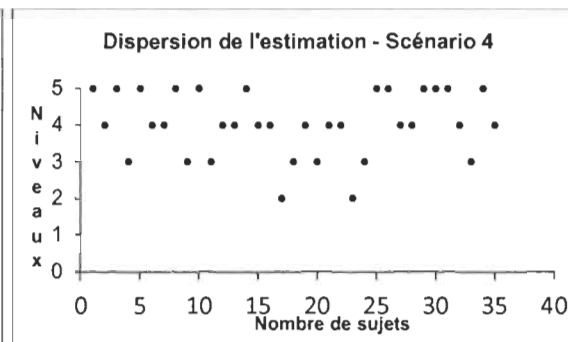


Figure 26 : Alternative E - Scénario 4

5.5.5.2 Analyse de la facilité à choisir un niveau de l'échelle des paramètres de probabilité

Comme le montre la figure 27, 69% des sujets ont déterminé que le choix d'un niveau de l'échelle est facile et 9% ont déterminé le choix comme difficile.

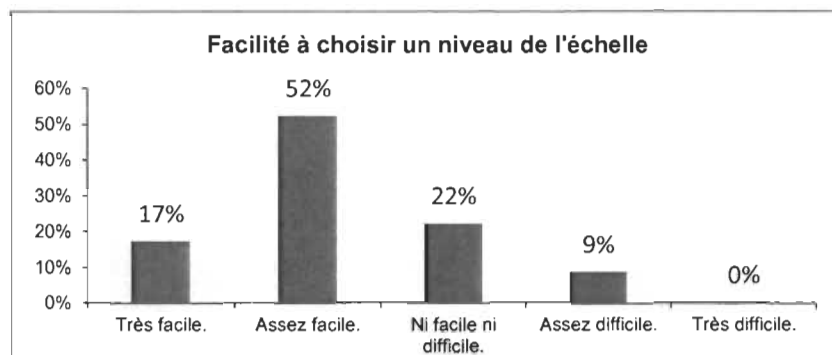


Figure 27 : Facilité à choisir un niveau de l'échelle - Alternative E

Selon les commentaires des sujets, concernant la difficulté à choisir un niveau de l'échelle, on remarque que le manque d'une définition claire et détaillée des niveaux fait que le choix soit difficile, comme le montrent les commentaires ci-dessous :

- Difficile de comprendre la signification des différents niveaux mais le nombre de niveaux était-il adéquat ?
- Les niveaux pourraient être mieux décrits.
- À mon avis, "Rare" devrait être plus fréquent que "Improbable" et le fait de placer "Rare" à la fin, m'a fait hésiter.
- Probable et possible, sans explication plus précise donc cela est plus difficile.
- Difficile de comprendre la signification des différents niveaux.
- Il n'est pas facile de faire une bonne différenciation entre très probable, probable et possible.
- Les termes et leur signification sont vagues.
- Mieux si on définit la différence entre improbable et rare et entre possible et probable.
- Sans définition, on y va directement avec notre intuition.

5.5.6 Alternative F

Cette alternative utilise une échelle ordinale de cinq niveaux définis de façon qualitative détaillée.

5.5.6.1 *Analyse de la variabilité de l'estimation de la probabilité*

Le tableau 36 montre les résultats de l'estimation de la probabilité faite par les sujets dans les quatre scénarios, en utilisant l'alternative F. Cette alternative a une variance moyenne de 0,97. Dans le scénario 2, elle a la variance la plus basse des quatre scénarios avec une valeur de 0,90; dans le scénario 4, elle a la variance la plus élevée des scénarios avec une valeur de 1,06.

Tableau 36 : Statistiques de l'estimation de la probabilité - Alternative F

Niveau	Alternative F	S1		S2		S3		S4	
1	Rare : très improbable car près de zéro	1	3%	0	0%	2	6%	1	3%
2	Improbable : occurrence possible, mais non anticipée	8	23%	10	29%	7	20%	2	6%
3	Possible : pourrait survenir	17	49%	16	46%	15	43%	15	43%
4	Probable : peut se produire, surviendra probablement dans la plupart des circonstances	5	14%	5	14%	9	26%	8	23%
5	Très probable : presque certain de se produire, surviendra vraisemblablement dans la plupart des circonstances	4	11%	4	11%	2	6%	9	26%
	Variance	0,96		0,90		0,94		1,06	
	Moyenne pondérée	3,09		3,09		3,06		3,63	
	Probabilité de référence	2,17		3,00		2,33		3,85	
	Écart avec la probabilité de référence	0,92		0,09		0,73		0,22	

Dans le scénario 2, cette alternative a l'écart le plus bas entre la moyenne pondérée et la probabilité de référence. Dans le scénario 1, elle a l'écart le plus élevé.

Les figures 28, 29, 30 et 31 montrent la dispersion des données pour les quatre scénarios. On observe dans les quatre scénarios, que les données sont plus concentrées dans les niveaux 2, 3, 4 et 5.

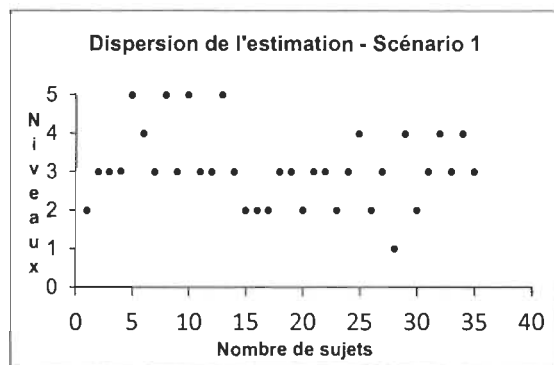


Figure 28 : Alternative F - Scénario 1

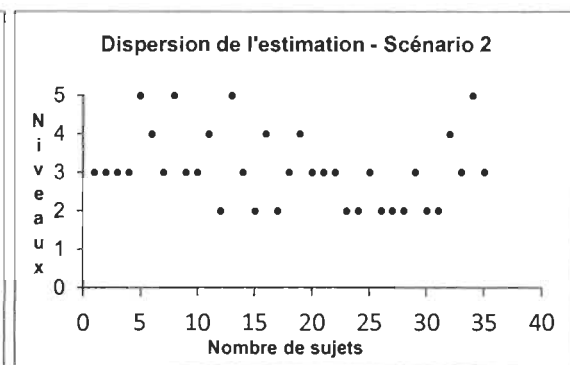


Figure 29 : Alternative F - Scénario 2

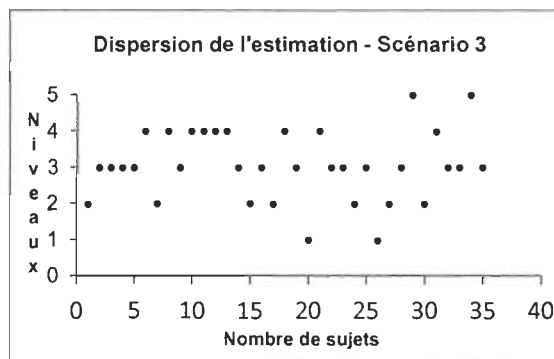


Figure 30 : Alternative F - Scénario 3

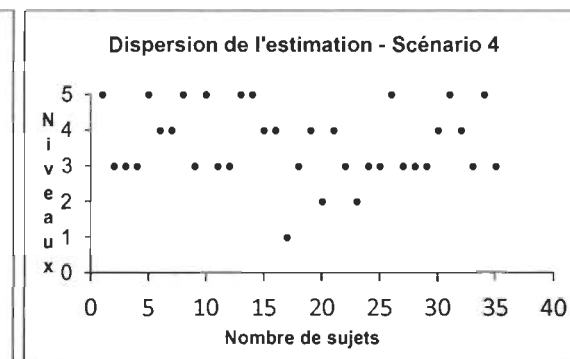


Figure 31 : Alternative F - Scénario 4

5.5.6.2 Analyse de la facilité à choisir un niveau de l'échelle des paramètres de probabilité

Comme le montre la figure 32, plus de la moitié des sujets (72%) ont déterminé que le choix d'un niveau de l'échelle est facile et 10% des sujets ont déterminé le choix comme difficile.

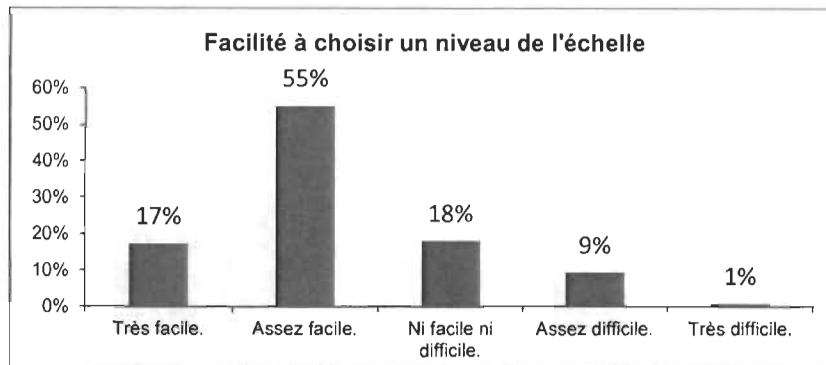


Figure 32 : Facilité à choisir un niveau de l'échelle - Alternative F

À la lecture des commentaires émis par les sujets, il semble que le manque de clarté dans la définition des niveaux a rendu difficile le choix d'un niveau. Exemple de quelques commentaires :

- *Pas très claire, ça serait bien de donner des chiffres pour bonifier le scénario.*
- *Plus facile que des nombres précis, mais avec la définition de "Improbable", il y a confusion avec "Possible".*
- *La définition des termes porte à confusion.*
- *Cette échelle est plus vague même si on fournit des explications pour probable, possible etc.*
- *Difficile de voir la différence entre "Peut se produire" et "Pourrait survenir"... Pour moi c'est la même chose.*
- *Assez détaillée mais pas suffisante.*

5.5.7 Alternative G

Cette alternative est définie de façon quantitative simple en utilisant une échelle ordinale de cinq niveaux.

5.5.7.1 *Analyse de la variabilité de l'estimation de la probabilité*

Le tableau 37 montre les résultats de l'estimation de la probabilité faite par les sujets dans les quatre scénarios, en utilisant l'alternative G. Cette alternative a une variance moyenne de 2,13. Dans le scénario 4, elle a la variance la plus basse des quatre scénarios avec une valeur de 1,73; dans le scénario 1, elle a la variance la plus élevée des scénarios avec une valeur de 2,48.

Tableau 37 : Statistiques de l'estimation de la probabilité - Alternative G

Niveau	Alternative G	S1	S2	S3	S4
1	$1 \cdot 10^{-2}$ par an.	9 26%	6 17%	8 23%	3 9%
2	$2 \cdot 10^{-2}$ par an.	4 11%	5 14%	7 20%	3 9%
3	$4 \cdot 10^{-2}$ par an.	4 11%	9 26%	3 9%	3 9%
4	$1 \cdot 10^{-1}$ par an.	9 26%	7 20%	9 26%	9 26%
5	$2 \cdot 10^{-1}$ par an.	9 26%	8 23%	8 23%	17 49%
	Variance	2,48	1,97	2,35	1,73
	Moyenne pondérée	3,14	3,17	3,06	3,97
	Probabilité de référence	2,17	3,00	2,33	3,85
	Écart avec la probabilité de référence	0,97	0,17	0,73	0,12

Dans le scénario 4, cette alternative a l'écart le plus bas entre la moyenne pondérée et la probabilité de référence. Dans le scénario 1, elle a l'écart le plus élevé.

Les figures 33, 34, 35 et 36 montrent la dispersion des données dans les quatre scénarios. Dans le scénario 4 on observe la plus forte concentration de données dans les niveaux 4 et 5.

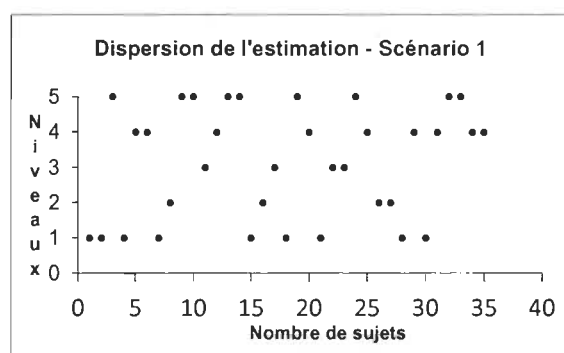


Figure 33 : Alternative G – Scénario 1

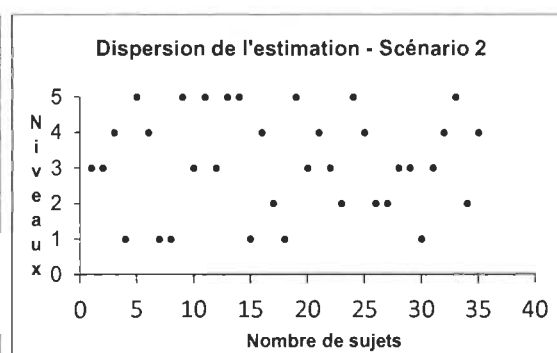


Figure 34 : Alternative G - Scénario 2

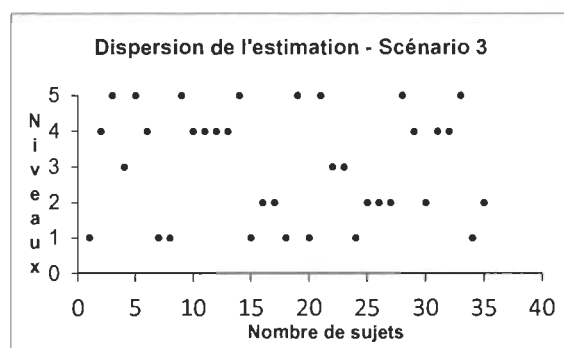


Figure 35 : Alternative G - Scénario 3

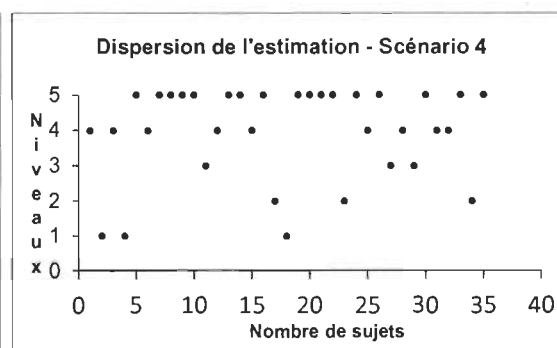


Figure 36 : Alternative G - Scénario 4

5.5.7.2 Analyse de la facilité à choisir un niveau de l'échelle des paramètres de probabilité

Pour 27% des sujets le choix d'un niveau de l'échelle a été facile et pour 57% le choix a été considéré comme difficile, comme le montre la figure 37.

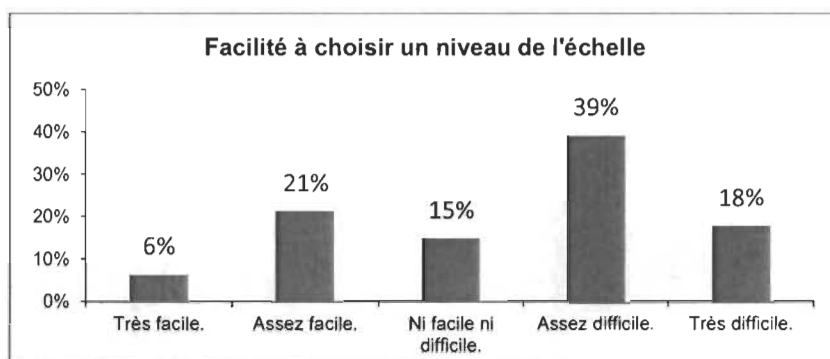


Figure 37 : Facilité à choisir un niveau de l'échelle - Alternative G

Selon les commentaires des sujets, concernant la difficulté à choisir un niveau de l'échelle, on remarque que la définition des niveaux n'est pas facile à comprendre et c'est nécessaire de faire le calcul pour savoir la probabilité. Celui-ci fait que le choix soit difficile, comme le montrent les commentaires ci-dessous :

- *La signification des différents niveaux est difficile à comprendre.*
- *Donner des chiffres est toujours plus compliqué.*
- *Informations trop complexes. Besoin de faire un calcul. Pas évident à répondre.*
- *Il faut calculer pour mieux saisir la probabilité.*
- *L'échelle demande de faire des calculs.*
- *Difficile de comprendre la signification des différents niveaux.*
- *Les termes utilisés dans la probabilité sont un peu compliqués.*
- *Besoin de transformer en 1 chance sur 10 etc.*
- *Chiffrer c'est plus difficile.*
- *Trop difficile à répondre avec les informations fournies.*
- *Cette façon numérique est plus embêtante.*
- *L'évaluation sous la forme des exposants sont compliquées pour évaluer la probabilité d'accident. On peut sous-estimer ou sur estimer la probabilité.*
- *Le format des choix est difficile à comprendre.*
- *Il faut faire des calculs pour ramener les niveaux à des termes plus habituels.*

- Chiffrer est toujours problématique, si on doit utiliser une notation exponentielle, cela ajoute une complexité additionnelle.

5.5.8 Alternative H

Cette alternative a une échelle ordinale de cinq niveaux avec des items de type Likert.

5.5.8.1 *Analyse de la variabilité de l'estimation de la probabilité*

Le tableau 38 montre les résultats de l'estimation de la probabilité faite par les sujets dans les quatre scénarios, en utilisant l'alternative H. Cette alternative a une variance moyenne de 1,38. Dans les scénarios 2 et 4, elle a la variance la plus basse des quatre scénarios avec une valeur de 1,24; dans le scénario 3, elle a la variance la plus élevée des scénarios avec une valeur de 1,63.

Tableau 38 : Statistiques de l'estimation de la probabilité - Alternative H

Niveau	Alternative H	S1	S2	S3	S4
1	Pas du tout d'accord	3 9%	1 3%	4 11%	1 3%
2	Pas d'accord	8 23%	12 34%	9 26%	4 11%
3	Ni en désaccord ni d'accord	11 31%	7 20%	6 17%	6 17%
4	D'accord	8 23%	11 31%	11 31%	12 34%
5	Tout à fait d'accord	5 14%	4 11%	5 14%	12 34%
	Variance	1,40	1,24	1,63	1,24
	Moyenne pondérée	3,11	3,14	3,11	3,86
	Probabilité de référence	2,17	3,00	2,33	3,85
	Écart avec la probabilité de référence	0,94	0,14	0,78	0,01

Dans le scénario 4, cette alternative a l'écart le plus bas entre la moyenne pondérée et la probabilité de référence. Dans le scénario 1, elle a l'écart le plus élevé.

Les figures 38, 39, 40 et 41 montrent la dispersion des données dans les quatre scénarios. Dans les scénarios 2 et 4, on observe une donnée dans le niveau 1; les autres données sont concentrées dans les niveaux 2,3, 4 et 5.

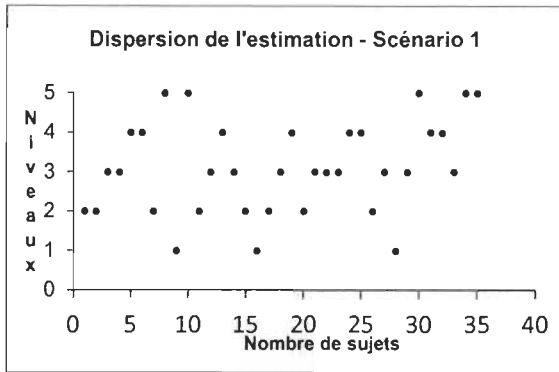


Figure 38 : Alternative H - Scénario 1

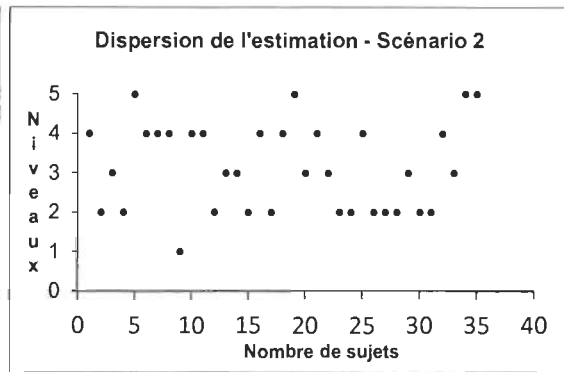


Figure 39 : Alternative H - Scénario 2

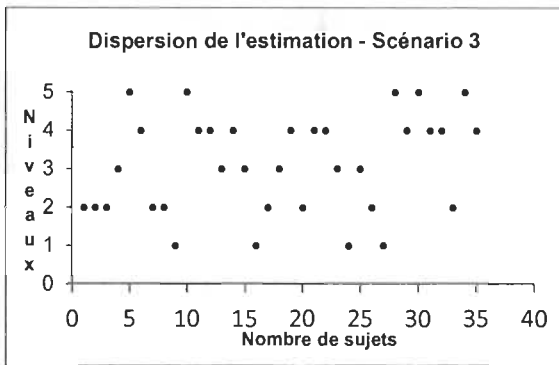


Figure 40 : Alternative H - Scénario 3

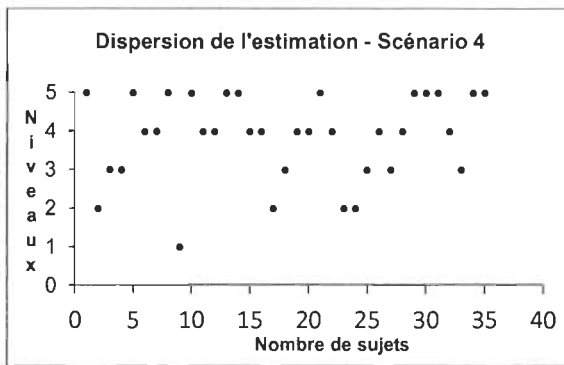


Figure 41 : Alternative H - Scénario 4

5.5.8.2 Analyse de la facilité à choisir un niveau de l'échelle des paramètres de probabilité

Comme le montre la figure 42, plus de la moitié des sujets (57%) ont déterminé que le choix d'un niveau de l'échelle est facile et 20% ont déterminé qu'est difficile le choix.

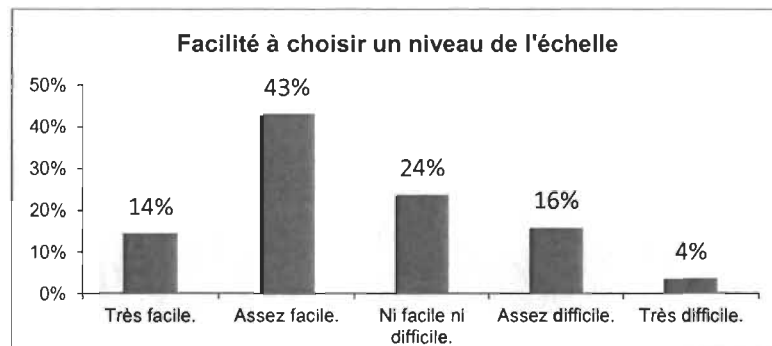


Figure 42 : Facilité à choisir un niveau de l'échelle - Alternative H

À la lecture des commentaires émis par les sujets, il semble que le manque de définition du terme « élevée » et la clarté de la définition des niveaux a rendu difficile le choix d'un niveau.

Exemple de quelques commentaires :

- *Il est difficile de comprendre la signification des différents niveaux.*
- *Les termes utilisés étaient vagues.*
- *Difficile de réponse pas définition sur élevée.*
- *Les niveaux de blessure autres qu'élevé sont exclus de la réponse.*
- *Le terme 'élevée' dans la question doit dépendre d'une référence qui n'est pas fournie.*
- *Le rapport entre la question et l'échelle n'est pas fort.*
- *Encore faut-il savoir ce qu'est un risque élevé !*
- *Que veut dire élevé ? 1% ou 70% ?*
- *Le type d'échelle est moins clair qu'une probabilité.*
- *La notion d'être d'accord en fonction de la probabilité élevée qui n'est pas définie.*
- *Comment devons-nous n'interpréter ni en désaccord ni en accord ??*

5.5.9 Alternative I

Cette alternative utilise une échelle de rapport (échelle de probabilité de 0% à 100%).

5.5.9.1 *Analyse de la variabilité de l'estimation de la probabilité*

Le tableau 39 montre les résultats de l'estimation de la probabilité faite par les sujets dans les quatre scénarios, en utilisant l'alternative I. Cette alternative a une variance moyenne de 1,88. Dans le scénario 1, elle a la variance la plus basse des quatre scénarios avec une valeur de 1,48; dans le scénario 4, elle a la variance la plus élevée des scénarios avec une valeur de 2,59.

Tableau 39 : Statistiques de l'estimation de la probabilité - Alternative I

Niveau	Alternative I	S1		S2		S3		S4	
1	0 à 20	26	74%	24	69%	24	69%	18	51%
2	21 à 40	2	6%	5	14%	4	11%	3	9%
3	41 à 60	3	9%	2	6%	2	6%	2	6%
4	61 à 80	2	6%	0	0%	2	6%	7	20%
5	81 à 100	2	6%	4	11%	3	9%	5	14%
	Variance	1,48		1,74		1,73		2,59	
	Moyenne pondérée	1,63		1,71		1,74		2,37	
	Probabilité de référence	2,17		3,00		2,33		3,85	
	Écart avec la probabilité de référence	0,54		1,29		0,59		1,48	

Dans le scénario 1, cette alternative a l'écart le plus bas entre la moyenne pondérée et la probabilité de référence. Dans le scénario 4, elle a l'écart le plus élevé.

Les figures 43, 44, 45 et 46 montrent la dispersion des données dans les quatre scénarios. Dans le scénario 1 on observe la plus forte concentration de données dans le niveau 1.

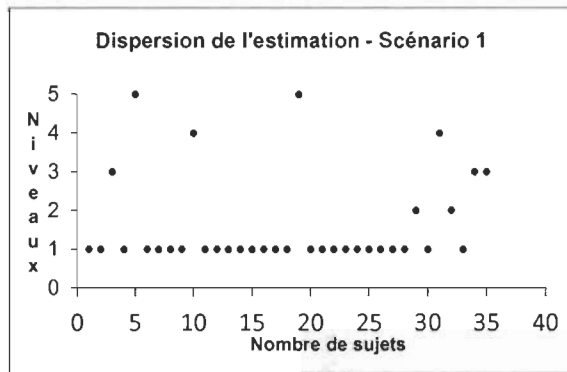


Figure 43 : Alternative I – Scénario 1

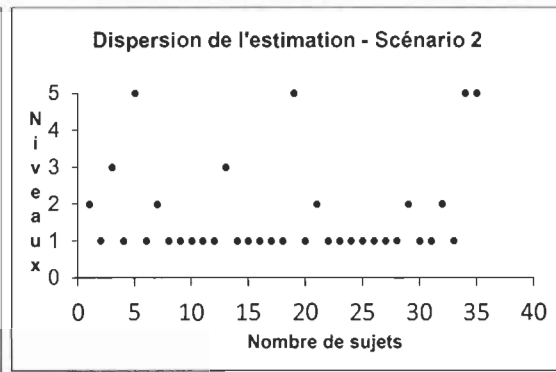


Figure 44 : Alternative I - Scénario 2

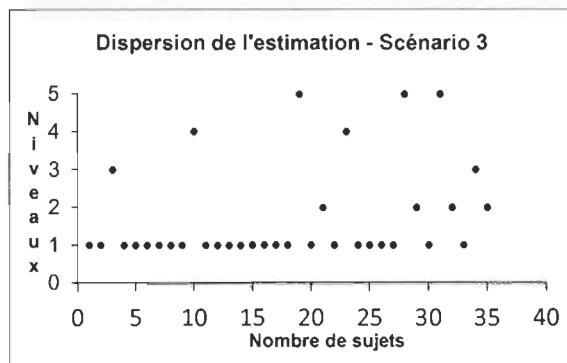


Figure 45 : Alternative I - Scénario 3

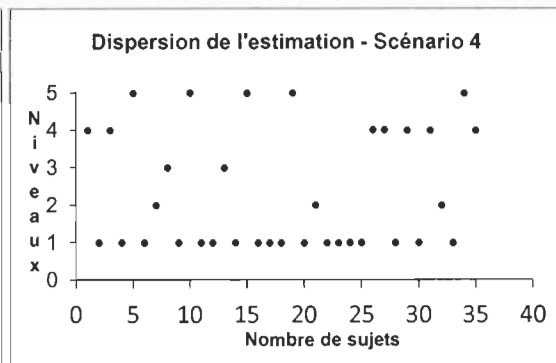


Figure 46 : Alternative I - Scénario 4

5.5.9.2 Analyse de la facilité à choisir un niveau de l'échelle des paramètres de probabilité

Pour 56% des sujets le choix d'un niveau de l'échelle a été facile et pour 22% le choix a été considéré comme difficile, comme le montre la figure 47.

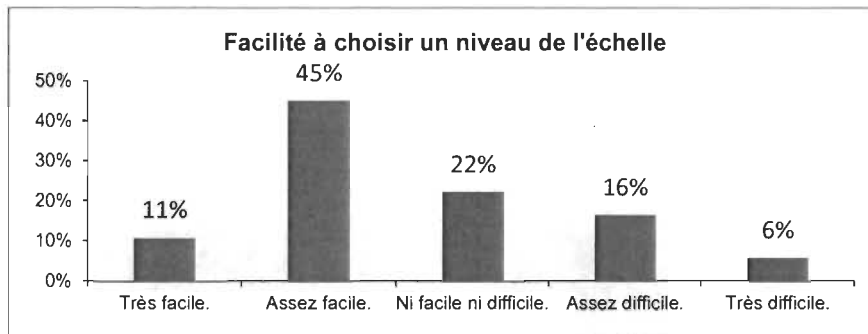


Figure 47 : Facilité à choisir un niveau de l'échelle - Alternative I

Selon les commentaires des sujets, concernant la difficulté à choisir un niveau de l'échelle, on remarque que chiffrer la probabilité fait que le choix soit difficile, comme le montrent les commentaires ci-dessous :

- *Pas facile à chiffrer.*
- *Ce genre de réponse est plus difficile à évaluer puisqu'il faut mettre un chiffre, par contre je ne suis pas contraint par des niveaux.*
- *Difficile de donner une valeur sans un choix. L'expérience aiderait à répondre.*
- *Tout chiffre exact requiert un calcul de probabilité. Comme il n'y a pas assez d'informations (nombre de fois d'utilisation de la machine), mon choix est assez difficile.*
- *Il est difficile de quantifier un risque. Le pourcentage est très aléatoire (on ne répondra difficilement 73 ou 71,5).*
- *Le fait de choisir le pourcentage dans ma réponse me donne beaucoup de flexibilité mais je ne peux pas expliquer le cheminement pour arriver à cette valeur. Celle-ci n'est basée que sur mon "feeling". Il manque plus d'information pour estimer ou calculer une probabilité correctement.*
- *Donner des chiffres est toujours plus compliqué.*
- *Le chiffre a été très difficile à choisir.*
- *Difficile à mettre un chiffre.*
- *Difficile de quantifier un risque sur une impression.*
- *C'est difficile d'accorder une valeur numérique qui pourrait illustrer réellement la probabilité.*

5.5.10 Alternative J

Cette alternative utilise une échelle visuelle analogue. L'échelle est une ligne de 100 millimètres qui a sur un extrême le mot « impossible » et sur l'extrême opposé le mot « certain ». Sur l'échelle est mesurée la probabilité d'occurrence d'une blessure au travailleur, en divisant la ligne en 100 mm. La mesure est effectuée à partir de l'extrémité gauche à l'extrémité droite.

5.5.10.1 *Analyse de la variabilité de l'estimation de la probabilité*

Le tableau 40 montre les résultats de l'estimation de la probabilité faite par les sujets dans les quatre scénarios, en utilisant l'alternative J. Cette alternative a une variance moyenne de 2,29. Dans les scénarios 1 et 4, elle a la variance la plus basse des quatre scénarios avec des valeurs de 2,24 et 2,25 respectivement ; dans le scénario 2, elle a la variance la plus élevée des scénarios avec une valeur de 2,37.

Tableau 40 : Statistiques de l'estimation de la probabilité - Alternative J

Niveau	Alternative J	S1		S2		S3		S4	
1	1 à 20	12	34%	12	34%	15	43%	7	20%
2	21 à 40	6	17%	8	23%	2	6%	2	6%
3	41 à 60	5	14%	5	14%	6	17%	7	20%
4	61 à 80	7	20%	3	9%	8	23%	8	23%
5	81 à 100	5	14%	7	20%	4	11%	11	31%
	Variance	2,24		2,37		2,31		2,25	
	Moyenne pondérée	2,63		2,57		2,54		3,40	
	Probabilité de référence	2,17		3,00		2,33		3,85	
	Écart avec la probabilité de référence	0,46		0,43		0,21		0,45	

Dans le scénario 3, cette alternative a l'écart le plus bas entre la moyenne pondérée et la probabilité de référence. Dans les scénarios 1 et 4, elle a l'écart le plus élevé.

Les figures 48, 49, 50 et 51 montrent la dispersion des données dans les quatre scénarios. On observe une dispersion de données semblable dans tous les scénarios.

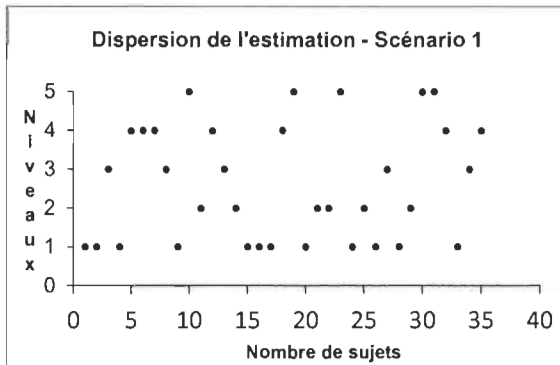


Figure 48 : Alternative J - Scénario 1

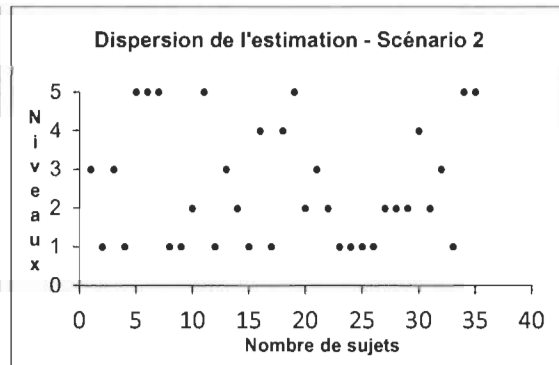


Figure 49 : Alternative J - Scénario 2

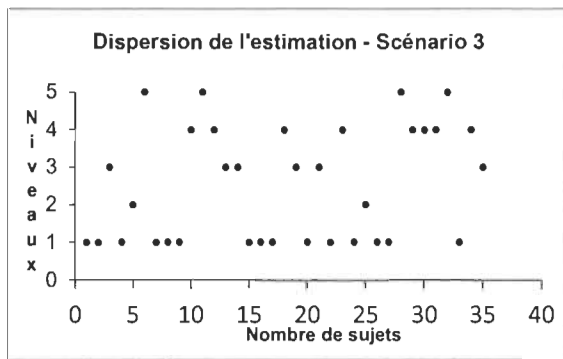


Figure 50 : Alternative J - Scénario 3

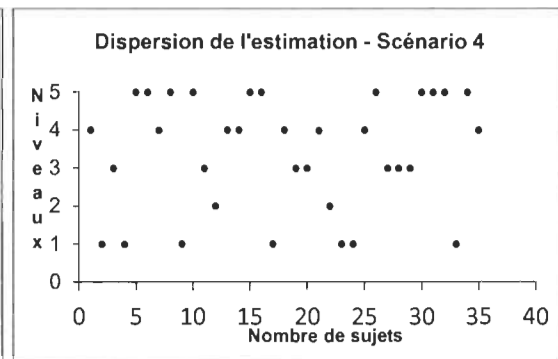


Figure 51 : Alternative J - Scénario 4

5.5.10.2 Analyse de la facilité à choisir un niveau de l'échelle des paramètres de probabilité

Comme le montre la figure 52, plus de la moitié des sujets (54%) ont déterminé que le choix d'un niveau de l'échelle est facile et 23% ont déterminé qu'est difficile le choix.

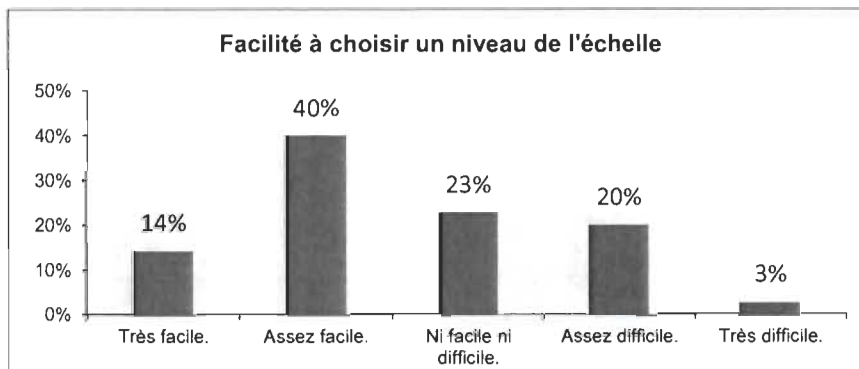


Figure 52 : Facilité à choisir un niveau de l'échelle - Alternative J

À la lecture des commentaires émis par les sujets, il semble que le manque de graduation avec chiffres dans l'échelle, a rendu difficile le choix d'un niveau. Exemple de quelques commentaires :

- *Il sera plus facile de faire le choix s'il y a des annotations sur les valeurs intermédiaires.*
- *L'échelle précise les extrêmes, sans contenir une graduation.*
- *Il est possible de choisir un degré de probabilité qualitatif mais cela ne permet pas de la quantifier.*
- *Pas de description des niveaux.*
- *Je préfère l'utilisation de chiffres pour mieux définir les différents niveaux de probabilités.*
- *Nombre infini de niveaux et difficile de quantifier la probabilité.*
- *Méthode plus difficile car peu de précision de la probabilité. En utilisant de chiffres par exemple : entre 0-20%, 20-40% etc.*
- *Il est plus facile s'il y a des divisions avec chiffres.*

5.6 Analyse globale des résultats expérimentaux

Dans cette section, l'écart moyen global (entre la moyenne pondérée des estimations de probabilité et la probabilité de référence), la variance moyenne globale et le pourcentage moyen global de difficulté (pour choisir un niveau de l'échelle des paramètres de probabilité) ont été considérés. Le tableau 41 montre les résultats globaux. L'analyse a débuté par les alternatives à 3 niveaux, suivie par les alternatives à 5 niveaux et en une analyse comparative des alternatives.

Dans cette analyse, les termes « juste, justesse, précise et précision » ont été utilisés. Les termes « juste et justesse » font référence à l'écart : à mesure que l'écart augmente la justesse diminue. Les termes « précise et précision » font référence à la variance et à la convergence des résultats : à mesure que la variance augmente la précision diminue.

Tableau 41 : Résultats globaux

Alternatives		Scénario 1 (S1)					Scénario 2 (S2)					Scénario 3 (S3)					Scénario 4 (S4)					Global		
		Moyenne pondérée	Probabilité de référence	Écart avec la probabilité de référence	Variance	Difficulté	Moyenne pondérée	Probabilité de référence	Écart avec la probabilité de référence	Variance	Difficulté	Moyenne pondérée	Probabilité de référence	Écart avec la probabilité de référence	Variance	Difficulté	Moyenne pondérée	Probabilité de référence	Écart avec la probabilité de référence	Variance	Difficulté	Écart moyen global	Variance moyenne globale	Difficulté moyenne globale
3 Niveaux	A	1,97	1,50	0,47	0,44	0,14	2,00	1,83	0,17	0,53	0,14	1,97	1,50	0,47	0,50	0,17	2,46	2,71	0,25	0,37	0,17	0,34	0,46	16%
	B	2,00	1,50	0,50	0,35	0,11	2,03	1,83	0,20	0,21	0,11	1,80	1,50	0,30	0,28	0,29	2,29	2,71	0,42	0,39	0,17	0,36	0,31	17%
	C	2,74	1,50	1,24	0,26	0,37	2,60	1,83	0,77	0,36	0,17	2,74	1,50	1,24	0,26	0,26	2,86	2,71	0,15	0,18	0,23	0,85	0,27	26%
Moyenne																					0,52	0,34	19%	
5 Niveaux	D	4,29	2,17	2,12	0,97	0,14	4,34	3,00	1,34	0,88	0,20	4,31	2,33	1,98	1,16	0,20	4,51	3,85	0,66	0,79	0,29	1,53	0,95	21%
	E	3,17	2,17	1,00	1,50	0,06	3,37	3,00	0,37	0,95	0,09	3,34	2,33	1,01	1,29	0,11	4,03	3,85	0,18	0,79	0,09	0,64	1,13	9%
	F	3,09	2,17	0,92	0,96	0,11	3,09	3,00	0,09	0,90	0,06	3,06	2,33	0,73	0,94	0,11	3,63	3,85	0,22	1,06	0,11	0,49	0,97	10%
	G	3,14	2,17	0,97	2,48	0,57	3,17	3,00	0,17	1,97	0,57	3,06	2,33	0,73	2,35	0,60	3,97	3,85	0,12	1,73	0,54	0,50	2,13	57%
	H	3,11	2,17	0,94	1,40	0,26	3,14	3,00	0,14	1,24	0,11	3,11	2,33	0,78	1,63	0,17	3,86	3,85	0,01	1,24	0,23	0,47	1,38	19%
	I	1,63	2,17	0,54	1,48	0,23	1,71	3,00	1,29	1,74	0,26	1,74	2,33	0,59	1,73	0,20	2,37	3,85	1,48	2,59	0,20	0,98	1,89	22%
	J	2,63	2,17	0,46	2,24	0,23	2,57	3,00	0,43	2,37	0,23	2,54	2,33	0,21	2,31	0,23	3,40	3,85	0,45	2,25	0,23	0,39	2,29	23%
Moyenne																					0,71	1,53	23%	

5.6.1 Alternatives à 3 niveaux

Ce groupe est formé par les alternatives A, B et C. Celles-ci ont le même nombre de niveaux, mais les définitions des niveaux sont différentes. L'alternative A, a une définition simple et les alternatives B et C ont une définition détaillée.

5.6.1.1 *Alternative A*

Cette alternative présente l'écart moyen global le plus bas dans ce groupe d'alternatives avec une valeur de 0,34 (voir tableau 44). Par rapport à la variance moyenne globale, cette alternative a la valeur la plus élevée (0,46). Le pourcentage de difficulté moyenne globale est le plus bas dans les trois alternatives (16%).

L'alternative A, est la plus juste et la plus facile à utiliser dans ce groupe d'alternatives, mais elle est la moins précise. Le petit nombre de niveaux jumelé à un manque de détails réduit la convergence.

5.6.1.2 *Alternative B*

Cette alternative a un écart moyen global de 0,36, lequel est au-dessous de la valeur moyenne de l'écart moyen global (0,52). La variance moyenne globale de cette alternative est au-dessous et proche de la moyenne de la variance moyenne globale. Le pourcentage de difficulté moyenne globale (17%) est très proche du pourcentage le plus bas.

L'alternative B, est facile à utiliser et elle a de bons niveaux de précision et de justesse.

5.6.1.3 *Alternative C*

Cette alternative présente l'écart moyen global le plus haut dans ce groupe d'alternatives (0,85). Par rapport à la variance moyenne globale, cette alternative a la valeur la plus basse (0,27). Le pourcentage de difficulté moyenne globale est le plus élevé dans les trois alternatives (26%).

L'alternative C, est la plus précise dans ce groupe d'alternatives, mais elle est la moins juste et la plus difficile à utiliser. L'échelle pose une certaine difficulté aux sujets ce qui semble avoir un impact important sur la sélection du niveau approprié.

5.6.2 Alternatives à 5 niveaux

Ce groupe est formé par les alternatives D, E, F, G, H, I et J. Celles-ci ont le même nombre de niveaux, mais les définitions des niveaux sont différentes.

5.6.2.1 *Alternative D*

Cette alternative a un écart moyen global de 1,53, lequel est le plus haut dans ce groupe d'alternatives. La variance moyenne globale de cette alternative est la plus basse des 7 alternatives. Le pourcentage de difficulté moyenne globale (21%) est proche de la moyenne du pourcentage de difficulté moyenne globale.

L'alternative D a un comportement semblable à l'alternative C. Elle est la plus précise dans ce groupe d'alternatives mais la moins juste. Elle est un peu difficile à utiliser. Son échelle numérique pose une certaine difficulté aux sujets ce qui semble avoir un impact important sur la sélection du niveau approprié.

5.6.2.2 *Alternative E*

Cette alternative présente un écart moyen global de 0,64, lequel est au-dessous et proche de la valeur moyenne de l'écart moyen global (0,71). Par rapport à la variance moyenne globale (1,13), cette alternative est située au-dessous de la moyenne de la variance moyenne globale (1,53). Le pourcentage de difficulté moyenne globale (9%) est le plus bas dans ce groupe d'alternatives.

L'alternative E, est la plus facile à utiliser dans ce groupe d'alternatives. Elle a de bons niveaux de précision et de justesse.

5.6.2.3 *Alternative F*

Cette alternative a un écart moyen global de 0,49, lequel est bas et éloigné de la moyenne de l'écart moyen global (0,71). La variance moyenne globale de cette alternative (0,97) est une des plus basses de ce groupe d'alternatives. Le pourcentage de difficulté moyenne globale (10%) est très proche du pourcentage le plus bas (9%).

L'alternative F, a les résultats les plus favorables de ce groupe d'alternatives. Elle est une des plus faciles à utiliser et elle a d'excellents niveaux de précision et de justesse.

5.6.2.4 *Alternative G*

Cette alternative a un écart moyen global de 0,50, lequel est bas et éloigne de la moyenne de l'écart moyen global (0,71). Par rapport à la variance moyenne globale (2,13), cette alternative a la deuxième valeur de variance la plus haute. Le pourcentage de difficulté moyenne globale (57%) est le plus haut dans ce groupe d'alternatives.

L'alternative G, est la pire de ce groupe d'alternatives. Elle est la plus difficile à utiliser dans ce groupe d'alternatives et elle n'est pas précise. Compte tenu de la variance, la moyenne n'a pas vraiment de signification.

5.6.2.5 *Alternative H*

Cette alternative a un écart moyen global de 0,47, lequel est bas et éloigne de la moyenne de l'écart moyen global (0,71). La variance moyenne globale de cette alternative (1,38) est proche de la moyenne de la variance moyenne globale (1,53). Le pourcentage de difficulté moyenne globale (19%) est au-dessous et proche de la moyenne du pourcentage de difficulté moyenne globale (23%).

L'alternative H, est facile à utiliser et elle a de bons niveaux de justesse et de précision.

5.6.2.6 *Alternative I*

Cette alternative a l'écart moyen global le plus haut de ce groupe d'alternatives. Par rapport à la variance moyenne globale (1,89), cette alternative a la troisième valeur de variance la plus haute. Le pourcentage de difficulté moyenne globale (22%) est très proche de la moyenne du pourcentage de difficulté moyenne globale (23%).

L'alternative I, est moyennement difficile à utiliser. Elle a de bas niveaux de justesse et de précision.

5.6.2.7 *Alternative J*

Cette alternative a l'écart moyen global le plus bas de ce groupe d'alternatives. La variance moyenne globale de cette alternative (2,29) est la valeur la plus haute dans ce groupe. Le pourcentage de difficulté moyenne globale est égal à la moyenne du pourcentage de difficulté moyenne globale (23%).

L'alternative J, est la moins précise de ce groupe d'alternatives. Elle a une grande variance. Compte tenu de la variance, la moyenne n'a pas vraiment de signification. L'alternative est moyennement difficile à utiliser.

5.6.3 Analyse comparative des alternatives

5.6.3.1 *Alternatives A et E*

Ces alternatives ont le même type de définition des niveaux (définition qualitative simple) mais le nombre de niveaux est différent. L'analyse a été faite en se basant sur le nombre de niveaux. L'alternative A a 3 niveaux et l'alternative E a 5 niveaux.

Tableau 42 : Analyse comparative des alternatives A et E

Statistiques	Alternatives	
	A	E
Écart moyen global relatif	11,3%	12,8%
Difficulté moyenne globale	16%	9%

L'analyse comparative de ces deux paramètres porte sur l'écart moyen global relatif et sur la difficulté moyenne globale. L'écart moyen global relatif est l'écart moyen global divisé par le nombre de niveau du paramètre et est exprimé en pourcentage. Compte de l'impact de la différence du nombre de niveaux sur cette variable, la variance moyenne globale n'a pas été comparée.

Comme le montre le tableau 42, l'écart moyen global relatif est comparable entre ces deux paramètres (11,3% versus 12,8%). Par contre, la difficulté moyenne globale est inférieure pour l'alternative E avec ses 5 niveaux. Ceci suggère que le paramètre à 5 niveaux offre une justesse comparable à celui à 3 niveaux, mais qu'il est considéré comme plus facile à utiliser.

5.6.3.2 *Alternatives B et F*

Ces alternatives ont le même type de définition des niveaux (définition qualitative détaillée) mais le nombre de niveaux est différent. L'analyse a été faite en se basant sur le nombre de niveaux. L'alternative B a 3 niveaux et l'alternative F a 5 niveaux.

Tableau 43 : Analyse comparative des alternatives B et F

Statistiques	Alternatives	
	B	F
Écart moyen global relatif	12,0%	9,8%
Difficulté moyenne globale	17%	10%

L'analyse comparative de ces deux paramètres a été réalisée de la même manière que pour les alternatives A et E (section 5.6.3.1).

Comme le montre le tableau 43, l'écart moyen global relatif est comparable entre ces deux paramètres (12,0% versus 9,8%). Par contre, ici encore la difficulté moyenne globale est inférieure pour l'alternative F avec ses 5 niveaux. On observe donc encore une fois que le paramètre à 5 niveaux permet une justesse comparable avec celui à 3 niveaux, mais qu'il est considéré comme plus facile à utiliser.

5.6.3.3 Alternatives C et D

Ces alternatives ont le même type de définition des niveaux (définition quantitative détaillée) mais le nombre de niveaux est différent. L'analyse a été faite en se basant sur le nombre de niveaux. L'alternative C a 3 niveaux et l'alternative D a 5 niveaux.

Tableau 44 : Analyse comparative des alternatives C et D

Statistiques	Alternatives	
	C	D
Écart moyen global relatif	28,3%	30,6%
Difficulté moyenne globale	26%	21%

L'analyse comparative de ces deux paramètres a été réalisée de la même manière que pour les alternatives A et E (section 5.6.3.1).

Comme le montre le tableau 44, l'écart moyen global relatif est comparable entre ces deux paramètres (28,3% versus 30,6%) mais la difficulté moyenne globale est inférieure pour l'alternative à 5 niveaux. Ceci semble confirmer la tendance à l'effet que les paramètres à 5 niveaux offrent une justesse comparable avec ceux à 3 niveaux, mais qu'ils sont plus faciles à utiliser.

5.6.3.4 Alternatives A et B

Ces alternatives ont le même nombre de niveaux (3 niveaux), mais la définition des niveaux est différente. L'analyse a été faite en se basant sur le détail des définitions. L'alternative A utilise une définition qualitative simple et l'alternative B utilise une définition qualitative détaillée.

Tableau 45 : Analyse comparative des alternatives A et B

Statistiques	Alternatives	
	A	B
Écart moyen global	0,34	0,36
Variance moyenne globale	0,46	0,31
Difficulté moyenne globale	16%	17%

Comme le montre le tableau 45, le comportement de ces deux alternatives est semblable dans l'écart moyen global et la difficulté moyenne globale. Toutefois, par rapport à la variance moyenne globale, on peut observer que l'alternative B présente une valeur plus basse.

Ces résultats de l'expérimentation suggèrent qu'une définition détaillée des niveaux de l'échelle comme celle que propose l'alternative B (réf. Section 4.2.1), influence la variance de l'estimation de la probabilité. Avec une définition détaillée des niveaux, la variance diminue.

5.6.3.5 Alternative E et F

Ces alternatives ont le même nombre de niveaux (5 niveaux), mais la définition des niveaux est différente. L'analyse a été faite en se basant sur le détail des définitions. L'alternative E utilise une définition qualitative simple et l'alternative F utilise une définition qualitative détaillée.

Tableau 46 : Analyse comparative des alternatives E et F

Statistiques	Alternatives	
	E	F
Écart moyen global	0,64	0,49
Variance moyenne globale	1,13	0,97
Difficulté moyenne globale	9%	10%

On peut observer dans le tableau 46, que le pourcentage de difficulté moyenne est semblable dans les deux alternatives. Par rapport à l'écart moyen global et la variance moyenne globale, l'alternative F présente les valeurs les plus basses.

Ces résultats de l'expérimentation semblent confirmer qu'une définition détaillée des niveaux de l'échelle influence positivement la variance de l'estimation de la probabilité. Avec une définition détaillée des niveaux, la variance diminue. La difficulté à choisir un niveau de l'échelle semble diminuer avec l'augmentation du nombre de niveaux.

6 DISCUSSION ET CONCLUSION

En sécurité de machines, il existe une variété d'outils qui utilisent différentes manières pour définir les paramètres de probabilité. La présente recherche s'est penchée sur 29 de ces outils présentés dans l'étude réalisée par Moulet (2009).

L'objectif général de cette étude consistait à évaluer les impacts que peut avoir la manière dont est défini le paramètre de probabilité d'occurrence du dommage lors de son évaluation. Pour atteindre cet objectif, les objectifs secondaires qui consistait à : identifier les types d'échelles et les types de structures utilisées dans différents domaines pour définir les paramètres de probabilité, réaliser une étude expérimentale en utilisant les alternatives élaborées pour définir les paramètres de probabilité et évaluer la performance des différentes alternatives, ont été considérés.

Ces objectifs ont été atteints avec la méthodologie utilisée qui consistait à déterminer les différentes manières dont les paramètres de probabilité sont définis dans les outils d'estimation de risque, ensuite, à élaborer des alternatives pour définir le paramètre de probabilité et à réaliser une étude expérimentale permettant de comparer les résultats obtenus par l'utilisation de ces différentes définitions des paramètres de probabilité.

6.1.1 Alternatives à 3 niveaux

Dans le groupe des alternatives à 3 niveaux, les résultats de l'expérimentation suggèrent qu'une définition qualitative détaillée des niveaux de l'échelle donne de bons résultats par rapport à la facilité d'utilisation, de la justesse et de la précision. Ce type de définition a été utilisé par l'alternative B.

Les résultats montrent également que les facteurs qui ont rendu difficile le choix d'un niveau dans ces alternatives sont le petit nombre des niveaux, le manque d'information suffisante et la clarté de la définition de chaque niveau.

Les commentaires émis par les participants par rapport à l'alternative C suggèrent qu'entre la définition de chaque niveau il y a trop d'écart et que le nombre de niveaux est trop restreint. Le premier niveau a été défini comme « une probabilité de 1 fois par 5 ans », le deuxième niveau a été défini comme « une probabilité de 1 fois par 25 ans » et le troisième niveau a été défini comme « une probabilité de 1 fois par 100 ans ». Avec ces commentaires et les résultats de l'expérimentation, on peut dire que l'écart entre les niveaux a pu inciter les

personnes à répondre de façon similaire. Ceci explique pourquoi la variance de cette alternative a été la plus basse et l'écart (avec les probabilités de référence) et la difficulté ont été les plus élevées.

Pour l'alternative A, les commentaires émis par les participants suggèrent que l'information donnée dans la définition des niveaux n'est pas suffisante pour comprendre sa signification. Ceci peut expliquer pourquoi la variance de cette alternative a été la plus élevée.

6.1.2 Alternatives à 5 niveaux

Dans le groupe des alternatives à 5 niveaux comme dans le groupe des alternatives à 3 niveaux, les résultats de l'expérimentation suggèrent qu'une définition qualitative détaillée des niveaux donne de bons résultats par rapport à la facilité d'utilisation, de la justesse et de la précision. Ce type de définition a été utilisé pour l'alternative F.

Les résultats suggèrent également que la définition des niveaux en utilisant des chiffres et exposants (alternative G), ne donne pas des bons résultats par rapport à la variance et à la facilité d'utilisation. Les commentaires émis par les sujets proposent que la définition des niveaux n'est pas facile à comprendre et qu'il est nécessaire de faire le calcul pour estimer la probabilité. Ceci explique pourquoi la variance et la difficulté de cette alternative ont été élevées.

Dans l'alternative D comme dans l'alternative C, les commentaires émis par les participants suggèrent qu'entre la définition de chaque niveau il y a trop d'écart. L'alternative D, utilise les cinq niveaux suivants : le premier niveau « une probabilité de 1 fois par 5 ans », le deuxième niveau « une probabilité de 1 fois par 10 ans », le troisième niveau « une probabilité de 1 fois par 25 ans », le quatrième niveau « une probabilité de 1 fois par 50 ans » et le cinquième niveau « une probabilité de 1 fois par 100 ans ». Les commentaires et les résultats de l'expérimentation montrent la même évaluation que pour l'alternative C, c'est-à-dire qu'on peut établir que l'écart entre les niveaux a pu inciter les personnes à choisir le même niveau. Ceci explique pourquoi la variance de cette alternative a été la plus basse, l'écart (avec la probabilité de référence) a été le plus élevé et la difficulté a été élevée.

Comme le proposent les résultats de l'expérimentation, l'utilisation d'une définition quantitative simple en utilisant une échelle de rapport ou une échelle visuelle analogue, ne donnent pas de bons résultats par rapport à la variance et à la facilité d'utilisation. Les commentaires émis par les sujets suggèrent que chiffrer la probabilité (alternative I) et n'avoir

pas de graduation avec chiffres dans l'échelle (alternative J) rend le choix difficile. Ceci explique pourquoi la variance est élevée dans les alternatives I et J.

Les résultats de l'expérimentation montrent enfin que la définition des niveaux en utilisant une structure qualitative simple (alternative E) ou une structure qualitative simple avec des items type Likert (alternative H), donne des résultats adéquats de variance et de facilité.

Les résultats de cette recherche permettent de conclure qu'il y a des différences importantes dans l'estimation du risque en sécurité de machines, lorsque le paramètre de probabilité d'occurrence du dommage est défini différemment. Quand les niveaux du paramètre de probabilité sont définis en utilisant une structure qualitative détaillée, cela peut diminuer la variance de l'estimation de la probabilité et peut aussi diminuer la difficulté du choix du niveau dans l'échelle. Quand les niveaux du paramètre de probabilité sont définis en utilisant des chiffres et exposants, cela peut augmenter la variance de l'estimation de la probabilité et la difficulté du choix du niveau dans l'échelle. À mesure que le nombre de niveaux augmente dans la définition du paramètre de probabilité, la variance de l'estimation de la probabilité peut augmenter. Il est aussi possible de dire que l'écart entre les niveaux de l'échelle peut influencer la variance de l'estimation de la probabilité.

Avec les résultats de cette étude, il est possible de souligner que les facteurs qui rendent difficile le choix d'un niveau dans le paramètre de probabilité sont le nombre insuffisant des niveaux, la pauvre définition des niveaux et l'écart entre les niveaux. Une estimation de la probabilité d'occurrence du dommage, plus précise et plus exacte, permettrait d'améliorer la qualité des analyses du risque pour les machines industrielles et comme conséquence de réduire le nombre d'accidents.

Cette recherche a eu les limites suivantes : en premier lieu, le profil des participants lequel a été défini comme « ingénieur dans n'importe quel domaine ». Ce profil a été choisi tenant compte que la formation académique d'un ingénieur donne les connaissances nécessaires pour faire l'estimation de la probabilité d'occurrence du dommage. Une autre limite de la recherche a été le nombre de participants, dans ce cas le nombre de participants a été de 37.

Il serait intéressant de construire un outil type tenant compte des résultats présentés dans cette recherche et de le tester avec un nombre supérieur à 100 participants, lesquels ont l'expérience dans l'estimation du risque en sécurité de machines ; dans le but de confirmer la justesse et la précision.

BIBLIOGRAPHIE

- Alexandre, V. (1971). *Les échelles d'attitude*. Paris: éditions universitaires.
- American National Standard (2000). *Technical report risk assessment and risk reduction. A guide to estimate, evaluate and reduce risk associated with machine tools*. ANSI B11.TR3.
- AS/NZS 4360:2004 (2004). Risk management, Australian and New-Zealand Standard, 28 p.
- Ball, D. J. et Watt, J. (2013). *Further Thoughts on the Utility of Risk Matrices*. London: Middlesex University, School of Science and Technology, Centre for Decision Analysis and Risk Management.
- Beyth-marom, R. (1982). How probable is probable? A numerical translation of verbal probability expressions. *Journal of forecasting*, Vol 1, 257-269.
- Booto, J. P., Bernard, P. et Plaisent, M. (2011). Consensus par la méthode Delphi sur les concepts clés des capacités organisationnelles spécifiques de la gestion de connaissances. *Recherches qualitatives*, Vol 29(3), pp 168-192.
- British Standard Institute (2004). *Occupational health and safety management systems*. Guide, 76p. BS 8800.
- Canadian Standard Association (1991). *Risk analysis requirements and guidelines*. CSA - Q634-91.
- Company A (2002). Identification des dangers et risques en santé/sécurité.
- Company R (2004). Évaluation des risque - Partie 2 : Évaluation des mesures de réduction des risques.
- Company X (1997). Tableau d'analyse de risque (sans titre).
- Cox, L. (2009). What's Wrong with Hazard-Ranking Systems? An Expository Note. *Risk Analysis*, Vol. 29, No. 7.
- Cox, L. (2008). What's Wrong with Risk Matrices?. *Risk Analysis*, Vol. 28, No. 2.
- Debaty, P. (1967). *La mesure des attitudes*. Paris: presses universitaires de France.
- Dictionnaires Le Robert (2013). *Le Petit Robert*. Dictionnaire alphabétique et analogique de la langue française, nouvelle édition millésime. Paris : dictionnaires Le Robert.
- Doron, R. et Parot, F. (1991). *Dictionnaire de psychologie*. Paris: presses universitaires de France.
- Franceschini, F., Galetto, M. et Varetto, M. (2004). Qualitative Ordinal Scales: The Concept of Ordinal Range. *Quality Engineering*, Vol. 16, No. 4, 515-524 pp.
- Gaito, J. (1980). Measurement Scales and Statistics: Resurgence of an Old Misconception. *Psychological Bulletin*, Vol. 87, No. 3, 564-567. Canada: York University.

Garcia, R. (2004). Diagnostico en la teleformacion: construcción y validación de un escalograma de Guttman. *Revista de Investigación Educativa*, Vol. 22, 277-302 pp. España: Universidad de Sevilla.

Giraud, L. (2008). *Sécurité des machines, prévention des phénomènes dangereux d'origine mécanique, protecteurs fixes et distances de sécurité (guide RG-552)*. Montréal : Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail.

Gondar Design (2000). Risk assessments, <http://www.purchon.co.uk/safety/risk.html>, 5 p

Gornemann, O. (2003). SICK AG Scalable Risk Analysis & Estimation Method (SCRAM), ISO/TC199 WG 5 N 0049, 12 p.

Gravel, R. (1994). *La méthodologie du questionnaire, guide à l'usage de l'enqueteur*. Québec: Editions Bo-Pre, Saint-Laurent.

HSL (2008). How to complete a methodical risk estimation?

Hubbard, D. et Evans, D. (2010). Problems with scoring methods and ordinal scales in risk assessment. *IBM J RES. & DEV*, Vol. 54 N. 3 Paper 2 May/June 2010.

International Electrotechnical Commission (2001). Railway applications - Specification and demonstration of reliability, availability, maintainability and safety (RAMS). IEC 62278.

James, H. (2013). Some thoughts on Likert-type scales. *International Journal of Clinical and Health Psychology*, 13, 83-86pp

Joel, M. (1986). Measurement Scales and Statistics: A Clash of Paradigms. *Psychological Bulletin*, Vol. 100. No. 3, 398-407. Sydney: University of Sydney, New South Wales.

Keszeia, A., Novaka, M. et Streiner, D. (2010). Introduction to health measurement scales. *Journal of Psychosomatic Research* 68, 319-323pp.

Kirchsteiger, C. (1999). On the use of probabilistic and deterministic methods in risk analysis. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 12 , 399-419pp.

Lamy, P. et Charpentier, P. (2009). *Estimation des risques machines, recensement des méthodes et subjectivité des paramètres de l'estimation (INRS ND 2305-214-09)*. Institute National de la recherche scientifique.

Le Roy, J. et Pierrette, M. (2012). *Petit manuel méthodologique du questionnaire de recherche, de la conception à l'analyse*. Paris: Enrick Editions.

Luce, D. et Narens, L. (1987). Measurement Scales on the Continuum. *Science New Series*, Vol. 236, 1527-1532 pp.

Macar, M. (1987). *Les échelles d'attitude, notes de sciences sociales N° 2*. Presses universitaires de Liège.

Main, B.W. (2004). *Risk Assessment Basics and Benchmark*. Michigan: Design Safety Engineering Inc.

Mortensen, A. (1998). Risk assessment - the "Nordic method". Danish National Working Environment Authority, Nordic minister council, DK: ISBN 87-7534-011 -9.

- Moulet, F. Étude comparative des outils d'estimation des risques associés aux machines industrielles. M.Sc.A. Université du Québec à Trois Rivières, Trois-Rivières, Qc, Canada, 2009.
- Narens, L. (2002). The Irony of measurement by subjective estimations. *Journal of Mathematical Psychology* 46, 769–788, University of California, Irvine.
- Narens, L. (2002). A Meaningful Justification for the Representational Theory of Measurement. *Journal of Mathematical Psychology* 46, 746–768 pp, University of California, Irvine.
- Nilsen, T. et Terje, A. (2002), Models and model uncertainty in the context of risk analysis. *Reliability Engineering and System Safety* 79, 309–317pp.
- Organisation Internationale de Normalisation (2007). *Sécurité des machines, Appréciation du risque, partie 1 : Principes*. ISO 14121-1.
- Organisation Internationale de Normalisation (2007). *Sécurité des machines, Appréciation du risque, partie 2 : Lignes directrices pratiques et exemples de méthodes*. ISO 14121-2.
- Organisation Internationale de Normalisation (2003). *Sécurité des machines, Notions fondamentales, principes généraux de conception*. ISO 12100.
- Organisation Internationale de Normalisation (2011). *Sécurité des machines, Notions fondamentales, principes généraux de conception*. ISO 12100.
- Organisation Internationale de Normalisation (2006). *Lifts (elevators), escalators and moving walks - Risk assessment and reduction methodology (annex C)*. ISO/TS 14798.
- Pâques, J.J., Gauthier, F. et Perez, A. (2007). Analysis and Classification of the Tools for Assessing the Risks Associated with industrial machines. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, Vol. 13, No. 2, 173–187pp.
- Pâques, J.J., Gauthier, F., Pérez, A., Charpentier, P., Lamy, P. et Roger, D. (2006). *Bilan raisonné des outils d'appréciation des risques associés aux machines industrielles* (R-459). Montréal: Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail.
- Potvin, P., Rousseau, R., St-Jean, M. et Potvin, Y. (1993). *L'échelle sémantique différentielle : un instrument de mesure des attitudes des professeurs et des élèves*. Trois-Rivières : Équipe de recherche en intervention psycho-éducative, Université du Québec à Trois Rivières.
- Ruge, B. (2004). Risk matrix as tool for risk assessment in the chemical process industries, BASF.
- Sanchez, F. (1998). *Psicologia social*. Madrid: Mc Graw Hill.
- Selltiz, C., Wrightsman, L. et Cook, S. (1977). *Les Méthodes de recherche en science sociales*. Montréal : Éditions H.R.W. 425 p.
- Sillamy, N. (1980). *Dictionnaire encyclopédique de psychologie*, volume 1 et 2. Paris.
- Stevens, S. S. (1946). On the theory of scales of measurement. *Science*, Vol 103, 677-680p.

Stevens, S. S. (1956). The direct estimation of sensory magnitudes – loudness. *The American Journal of Psychology*, Vol. 100, 664 – 689 pp.

SUVA (2002). Méthode SUVA d'appréciation des risques liés aux installations et appareils techniques. *Caisse nationale suisse d'assurance en cas d'accidents*

Takafumi, W., Natsumi, U. et Hiroyuki, N. (2012). Psychological Distance Between Categories in the Likert Scale: Comparing Different Numbers of Options. *Educational and Psychological Measurement* 72: 533 – 546pp.

Tapia, C. et Roussay, P. (1991). *Les attitudes. Question-exercices corrigés-exemples*. Paris : Les éditions d'organisation.

Terje, A. et Kurt, P. (1998). Expressing and interpreting the results of quantitative risk analyses, Review and discussion. *Reliability Engineering and System Safety* 61 (1998) 3-10 pp.

Terje, A. et Genserik, R. (2012). How to define and interpret a probability in a risk and safety setting. *Safety Science* 51, 223–231pp.

Terje, A. (2010). Interpretations of alternative uncertainty representations in a reliability and risk analysis context. *Reliability Engineering and System Safety* 96, 353–360pp.

Terje, A. et Nokland (2009). On the use of uncertainty importance measures in reliability and risk analysis. *Reliability Engineering and System Safety* 95, 127–133pp.

Terje, A. et Heide, B. (2009). Reliability and validity of risk analysis. *Reliability Engineering and System Safety* 94, 1862–1868pp.

Thomas, R. et Alaphilipe, D. (1983). *Les attitudes*. Paris.

US Department of Defense (2000). *Standard practice for system safety (Appendix A)*. MIL-STD-882D.

Worsell, N. et Wilday, J. (1997). The Application of risk assessment to machinery safety: Review of ranking and risk estimation techniques, health and safety laboratory, UK, 130 p.

ANNEXE 1 : Outils d'estimation du risque en sécurité de machines

Outils d'estimation du risque en sécurité de machines

# Outil	Référence	Provenance
1	Worsell, N, Wilday, J. (1997). The Application of risk assessment to machinery safety: Review of ranking and risk estimation techniques, health and safety laboratory, UK, 130 p.	Compagnie et université.
3	BS 8800:2004 (2004). Occupational health and safety management systems - Guide, British Standard Institute, 76 p.	Compagnie.
6	Worsell, N, Wilday, J. (1997). The Application of risk assessment to machinery safety: Review of ranking and risk estimation techniques, health and safety laboratory, UK, 130 p.	Guide "The institution of occupational safety and health".
7	Machinery safety: The risk-based approach, practical guidelines on risk assessment, standards and legislation.	The health and safety series - Best practice management reports (publication).
10	Worsell, N, Wilday, J. (1997). The Application of risk assessment to machinery safety: Review of ranking and risk estimation techniques, health and safety laboratory, UK, 130 p.	Livre "Hazard identification and risk assessment".
17	Machinery Safety: The risk-based approach, practical guidelines on risk assessment, standards and legislation.	The health and safety series - Best practice management reports (publication).
19	Worsell, N, Wilday, J. (1997). The Application of risk assessment to machinery safety: Review of ranking and risk estimation techniques, health and safety laboratory, UK, 130 p.	Guide "The machinery directive : related topics"
24	ANSI BII.TR3 (2000). ANSI Technical report risk assessment and risk reduction - A guide to estimate, evaluate and reduce risk associated with machine tools, American National Standard.	Guide "Risk assessment and risk reduction".
33	Main, B. (2004). Risk assessment basics and benchmark, design safety engineering, 485 p.	Guide "Consumer products".
34	Main, B. (2004). Risk assessment basics and benchmark, design safety engineering, 485 p.	Guide "Risk assessment : Basics and benchmarks".
35	Main, B. (2004). Risk assessment basics and benchmark, design safety engineering, 485 p.	Guide "Risk assessment : Basics and benchmarks".
41	ISO/TS 14798 (2006). Lifts (elevators), escalators and moving walks - Risk assessment and reduction methodology (annex C).	Norme ISO/TS 14798 : 2006.
44	MIL-STD-882D (2000). Standard practice for system safety (Appendix A), US department of defense.	Guide.
45	Main, B. (2004). Risk assessment basics and benchmark, design safety engineering, 485 p.	Guide "Risk assessment : Basics and benchmarks" (US ARMY).
46	Main, B. (2004). Risk assessment basics and benchmark, design safety engineering, 485 p.	Guide "Risk assessment : Basics and benchmarks" (US NAVY).
48	AS/NZS 4360:2004 (2004). Risk management, Australian and New-Zealand Standard, 28 p.	Guide "Risk assessment : Basics and benchmarks".
53	Company A (2002). Identification des dangers et risques en santé/sécurité.	Procédure de compagnie.
57	Company X (1997). Tableau d'analyse de risque (sans titre).	Procédure de compagnie.
58	Company R (2004). Évaluation des risque - Partie 2: Évaluation des mesures de réduction des risques.	Guide compagnie.
62	SUVA (2002). Méthode SUVA d'appréciation des risques liés aux installations et appareils techniques, caisse nationale suisse d'assurance en cas d'accidents.	Publication : Méthode d'appréciation des risques.
66	IEC 62278 (2001). Railway applications the specification and demonstration of Reliability, availability, maintainability and safety (RAMS), International Electrotechnical Committee.	Guide IEC 62278 : 2002.
67	Mortensen, A. (1998). Risk assessment - the "Nordic 67 method", Danish National Working Environment Authority, Nordic minister council.	Norme ISO 14121-2.
69	Gomemann, O (2003). SICK AG Scalable risk 69 analysis & estimation method (SCRAM), ISO/TC199 WG 5 N 0049, 12 p.	Norme ISO/TC 199/WG 5 N 0049.
85	Ruge, B. (2004). BASF Risk matrix as tool for risk assessment in the chemical process industries, BASF.	Publication "Risk matrix as tool for risk assessment in the chemical process industries".
89	The metal manufacturing and minerals processing industry committee (2002). A guide to practical machine guarding, Queensland government -Workplace health and safety.	Guide "A guide to practical machine guarding".
91	Norme ISO 14121 (2007).	Norme ISO 14121-2.
94	CSA -Q634-91 (1991). Risk analysis requirements and guidelines, Canadian Standard Association.	Guide "Risk analysis requirements and guidelines".
102	Gondar Design (2000). Risk assessments, http://www.purchon.co.uk/safety/risk.html , 5 p.	Guide "Risk assessment".
114	HSL (2008). How to complete a methodical risk estimation?	Publication "How to complete a methodical risk estimation".

ANNEXE 2 : Scénarios

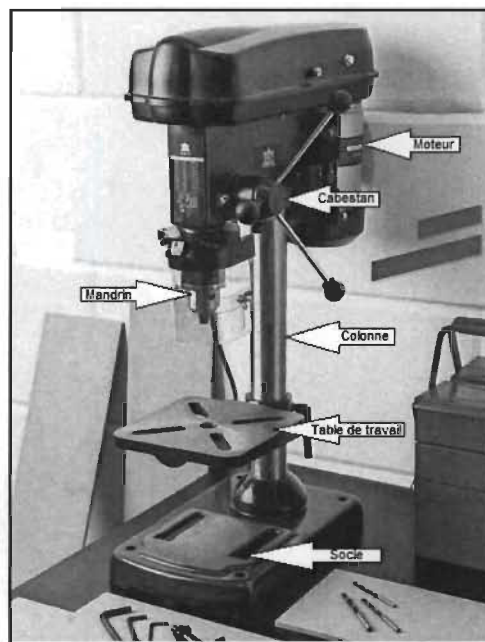
SCÉNARIO 1

Perceuse à colonne

L'image ci-dessous montre une perceuse à colonne utilisée dans un atelier d'une université. Elle est normalement utilisée environ deux heures par semaine, par un technicien ayant plus de 5 ans d'expérience dans l'utilisation de machines d'usinage.

Pendant le perçage, le technicien peut parfois maintenir la pièce en place en la tenant avec sa main. Si la pièce venait à être entraînée par le mouvement de rotation de la mèche, le technicien pourrait subir une coupure à la main.

En considérant une utilisation de cette machine durant les **5 prochaines années**, quelle serait à votre avis la probabilité qu'un travailleur subisse cette blessure ?



SCÉNARIO 2

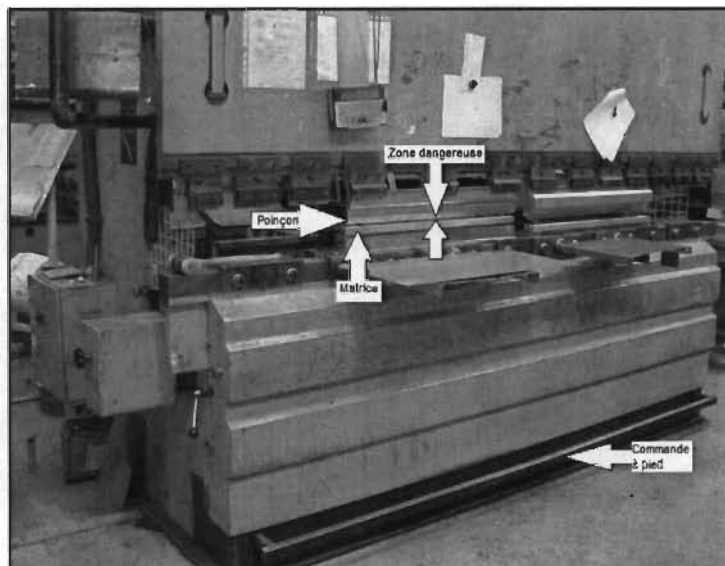
Presse hydraulique

L'image ci-dessous montre une presse plieuse hydraulique avec une commande au pied (la longue barre devant la machine), utilisée dans une usine de fabrication de portes. Elle est utilisée 8 heures par jour, par des opérateurs formés et ayant au moins 2 années d'expérience dans cette usine.

L'ouverture entre le poinçon et la matrice (la zone dangereuse) est de 6 cm et la vitesse de descente de la partie supérieure est de 1 cm par seconde. Il faut donc 6 secondes pour que la partie supérieure descende complètement. Pendant le pliage, l'opérateur doit placer les mains à une distance de cinq centimètres de la zone dangereuse.

Si les mains ou les doigts de l'opérateur se trouvaient dans la zone dangereuse lorsque le travailleur appuie sur la commande aux pieds, celui-ci pourrait subir une amputation.

En considérant une utilisation de cette machine durant les **5 prochaines années**, quelle serait à votre avis la probabilité qu'un travailleur subisse cette blessure ?



SCÉNARIO 3

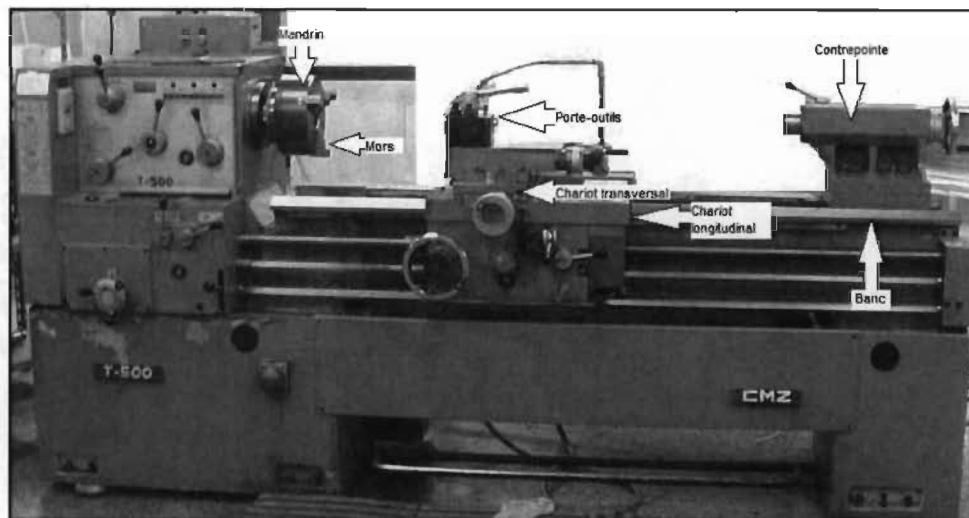
Tour conventionnel

L'image ci-dessous montre un tour conventionnel utilisé dans un atelier de fabrication mécanique. Il est normalement utilisé d'une à deux heures par jour, par des techniciens d'usinage formés et avec des niveaux d'expérience variés.

Ceux-ci portent généralement leurs lunettes de sécurité dans l'atelier et l'application de cette mesure de sécurité est surveillée par la direction.

Lors de l'usinage, il peut arriver que des petits copeaux de métal soient projetés vers le technicien. Si un copeau atteignait l'œil du technicien, il pourrait entraîner une légère irritation de l'œil.

En considérant une utilisation de cette machine durant les **5 prochaines années**, quelle serait à votre avis la probabilité qu'un technicien subisse cette blessure ?



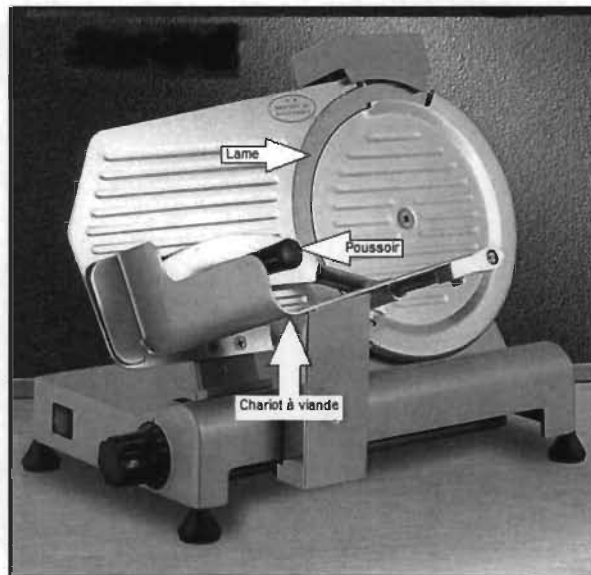
SCÉNARIO 4

Trancheuse à viande

L'image ci-dessous montre une trancheuse à viande utilisée dans une boucherie de supermarché. Elle est utilisée plusieurs fois par jour par des commis de boucherie. Ceux-ci ont reçu une formation d'une heure sur l'opération et le nettoyage de la machine, incluant les aspects de sécurité. Ils travaillent toujours sous la supervision de bouchers d'expérience.

La machine est pourvue d'un poussoir (la poignée noire) servant à éloigner la main de l'utilisateur de la lame. Lors l'utilisation de la machine, les doigts du commis pourraient entrer en contact avec la lame rotative, entraînant des coupures sévères.

En considérant une utilisation de cette machine durant les **5 prochaines années**, quelle serait à votre avis la probabilité qu'un commis subisse cette blessure ?



Annexe 3 : Documents utilisés pour établir les probabilités de référence

Courriel pour les experts

Deuxième tour

Sujet : Étude sur l'estimation des risques en sécurité de machines.

Bonjour,

Je me nomme José Angel Cardenas et je suis étudiant à la maîtrise en génie industriel à l'UQTR.

Vous avez participé récemment à la recherche que je mène actuellement sous la direction de Monsieur **François Gauthier**. Cette étude a pour but d'établir l'impact des différentes définitions possibles des paramètres de probabilité dans l'estimation des risques en sécurité de machines.

Dans la première étape de cette technique Delphi, vous avez fait l'estimation de la probabilité de blessure sur une échelle visuelle analogue. Dans cette seconde et dernière étape, nous vous demandons poursuivre l'étude remplissant l'outil d'expérimentation ci-joint.

Une fois complété, vous pouvez nous retourner le questionnaire numérisé par courriel à l'adresse suivante :

Jose.angel.cardenas@uqtr.ca

Ou bien par la poste à l'adresse ci-dessous

François Gauthier
Département de génie industriel
École d'ingénierie
Université du Québec à Trois-Rivières
C.P. 500 Trois-Rivières (Québec), G9A 5H7

Merci beaucoup de votre précieuse collaboration,

José Angel Cardenas G.

Scénarios

Deuxième tour

En considérant les résultats obtenus par le groupe d'experts, vous avez l'occasion de modifier ou de conserver la même estimation.

La valeur moyenne des estimations faites par le groupe d'experts et la valeur de votre estimation (X) sont indiquées sur chacune des échelles visuelles analogues ci-jointes.

Si, à la lumière de l'estimation de l'ensemble des autres experts, vous souhaitez modifier votre estimation, vous pouvez placer un nouveau « X » sur la ligne. Si par contre vous préférez conserver votre estimation précédente, vous devez encercler le « X » de votre estimation précédente. Nous vous demandons également préciser brièvement les motifs de votre décision.

Votre participation est anonyme et confidentielle. Nous vous demandons de remplir honnêtement l'outil d'expérimentation.

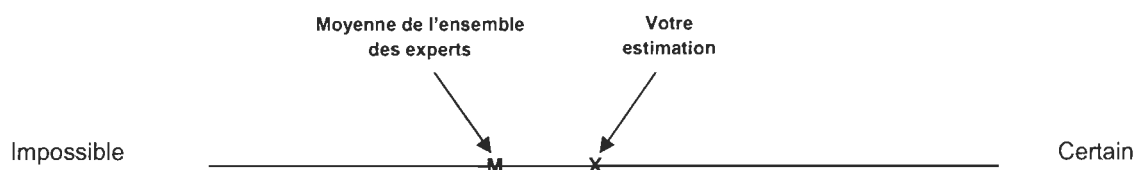
Nous vous remercions de votre collaboration.

SCÉNARIO 1 : Perceuse à colonne

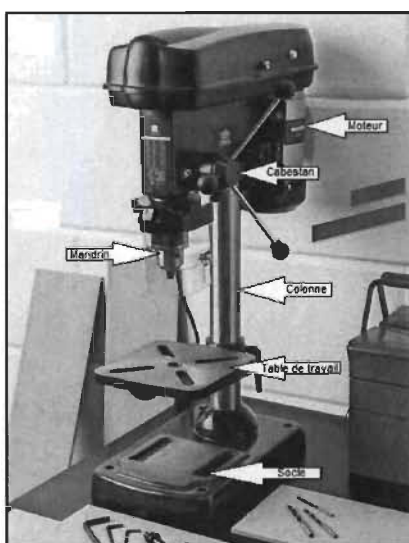
L'image ci-dessous montre une perceuse à colonne utilisée dans un atelier d'une université. Elle est normalement utilisée environ deux heures par semaine, par un technicien ayant plus de 5 ans d'expérience dans l'utilisation de machines d'usinage.

Pendant le perçage, le technicien peut parfois maintenir la pièce en place en la tenant avec sa main. Si la pièce venait à être entraînée par le mouvement de rotation de la mèche, le technicien pourrait subir une coupure à la main.

En considérant une utilisation de cette machine durant les **5 prochaines années**, quelle serait à votre avis la probabilité qu'un travailleur subisse cette blessure?



Motifs de votre décision :



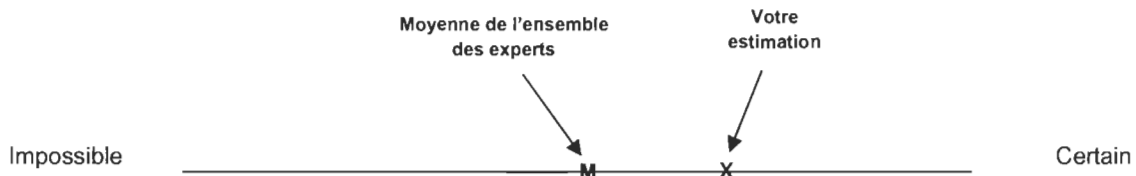
SCÉNARIO 2 : Presse hydraulique

L'image ci-dessous montre une presse plieuse hydraulique avec une commande au pied (la longue barre devant la machine), utilisée dans une usine de fabrication de portes. Elle est utilisée 8 heures par jour, par des opérateurs formés et ayant au moins 2 années d'expérience dans cette usine.

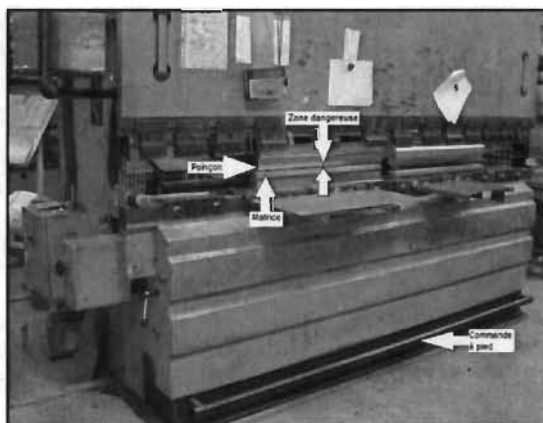
L'ouverture entre le poinçon et la matrice (la zone dangereuse) est de 6 cm et la vitesse de descente de la partie supérieure est de 1 cm par seconde. Il faut donc 6 secondes pour que la partie supérieure descende complètement. Pendant le pliage, l'opérateur doit placer les mains à une distance de cinq centimètres de la zone dangereuse.

Si les mains ou les doigts de l'opérateur se trouvaient dans la zone dangereuse lorsque le travailleur appui sur la commande aux pieds, celui-ci pourrait subir une amputation.

En considérant une utilisation de cette machine durant les **5 prochaines années**, quelle serait à votre avis la probabilité qu'un travailleur subisse cette blessure?



Motifs de votre décision :



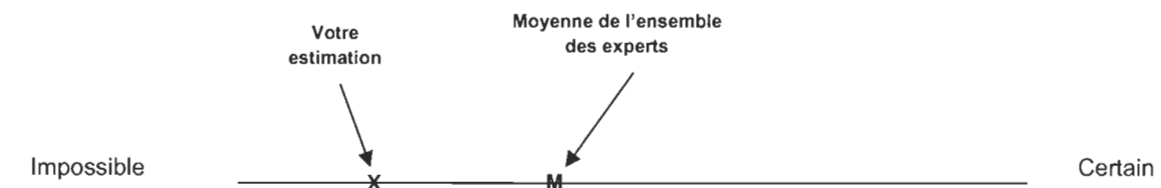
SCÉNARIO 3 : Tour conventionnel

L'image ci-dessous montre un tour conventionnel utilisé dans un atelier de fabrication mécanique. Il est normalement utilisé d'une à deux heures par jour, par des techniciens d'usinage formés et avec des niveaux d'expérience variés.

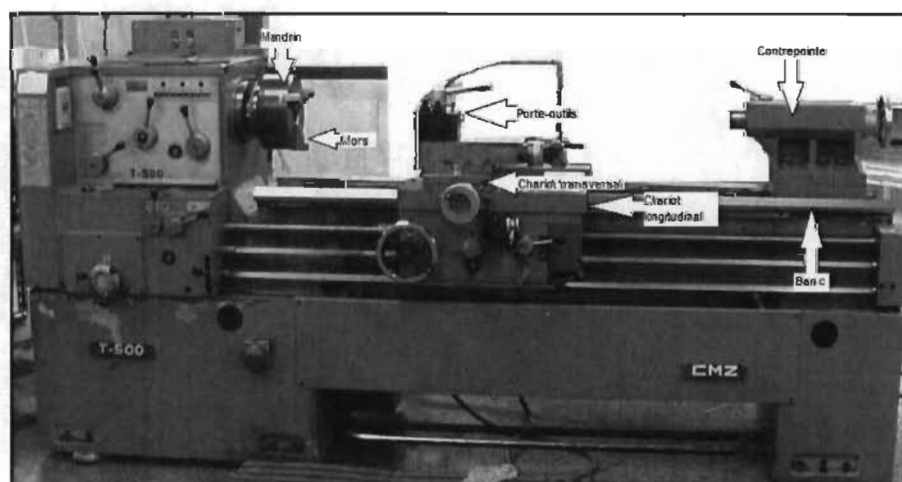
Ceux-ci portent généralement leurs lunettes de sécurité dans l'atelier et l'application de cette mesure de sécurité est surveillée par la direction.

Lors de l'usinage, il peut arriver que des petits copeaux de métal soient projetés vers le technicien. Si un copeau atteignait l'œil du technicien, il pourrait entraîner une légère irritation de l'œil.

En considérant une utilisation de cette machine durant les **5 prochaines années**, quelle serait à votre avis la probabilité qu'un technicien subisse cette blessure?



Motifs de votre décision :

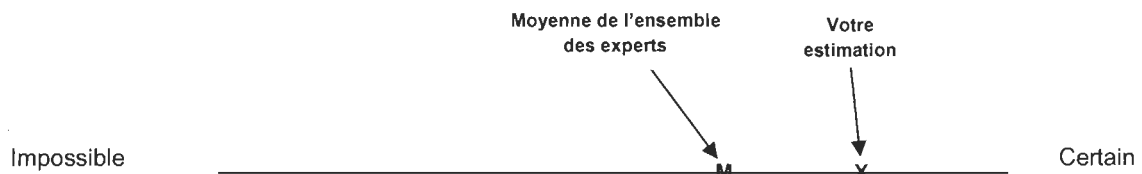


SCÉNARIO 4 : Trancheuse à viande

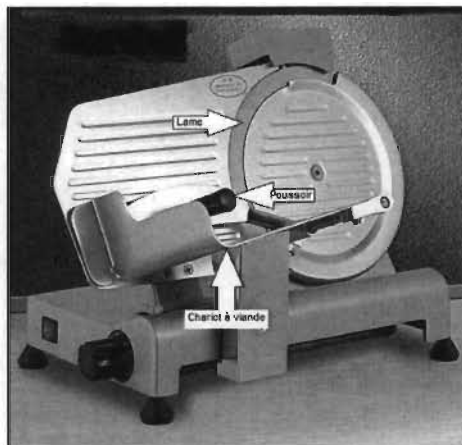
L'image ci-dessous montre une trancheuse à viande utilisée dans une boucherie de supermarché. Elle est utilisée plusieurs fois par jour par des commis de boucherie. Ceux-ci ont reçu une formation d'une heure sur l'opération et le nettoyage de la machine, incluant les aspects de sécurité. Ils travaillent toujours sous la supervision de bouchers d'expérience.

La machine est pourvue d'un poussoir (la poignée noire) servant à éloigner la main de l'utilisateur de la lame. Lors l'utilisation de la machine, les doigts du commis pourraient entrer en contact avec la lame rotative, entraînant des coupures sévères.

En considérant une utilisation de cette machine durant les **5 prochaines années**, quelle serait à votre avis la probabilité qu'un commis subisse cette blessure?



Motifs de votre décision :



Annexe 4 : Aperçu de l'outil d'expérimentation

Outil d'expérimentation pour déterminer la variabilité de l'estimation de la probabilité et la facilité à choisir un niveau de l'échelle.

Bienvenue à l'expérimentation

En remplissant ce questionnaire, vous participez à une recherche sur l'étude de la définition des paramètres de probabilité utilisés dans les outils d'estimation des risques en sécurité des machines. Cette recherche a comme objectif d'établir les différences qu'il peut y avoir dans l'estimation du risque en sécurité de machines, lorsque les paramètres de probabilité sont définis différemment, dans les outils d'estimation du risque. Votre participation est anonyme et confidentielle. Nous vous demandons de remplir honnêtement le questionnaire.

Le questionnaire peut être rempli une fois seulement. Une fois que vous avez commencé le questionnaire, vous ne pouvez pas le recommencer. Vous ne pouvez pas consulter les questions précédentes. Vous devez répondre à toutes les questions.

Le questionnaire comprend quatre scénarios avec des images sur lesquelles nous vous demandons de faire l'estimation de la probabilité de blessure au travailleur.

Merci de votre participation à notre expérimentation. Votre avis nous est précieux.

1 / 38



3%

Suiv

Outil d'expérimentation pour déterminer la variabilité de l'estimation de la probabilité et la facilité à choisir un niveau de l'échelle.

Information générale

*** 1. Sexe:**

- ☐ Homme
- ☐ Femme

*** 2. Âge:**

- ☐ Entre 18 et 30 ans.
- ☐ Entre 31 et 40 ans.
- ☐ Entre 41 et 50 ans.
- ☐ Plus de 50 ans.

*** 3. Domaine:**

- ☐ Génie industriel.
- ☐ Génie mécanique.
- ☒ Génie électrique.
- ☐ Génie chimique.

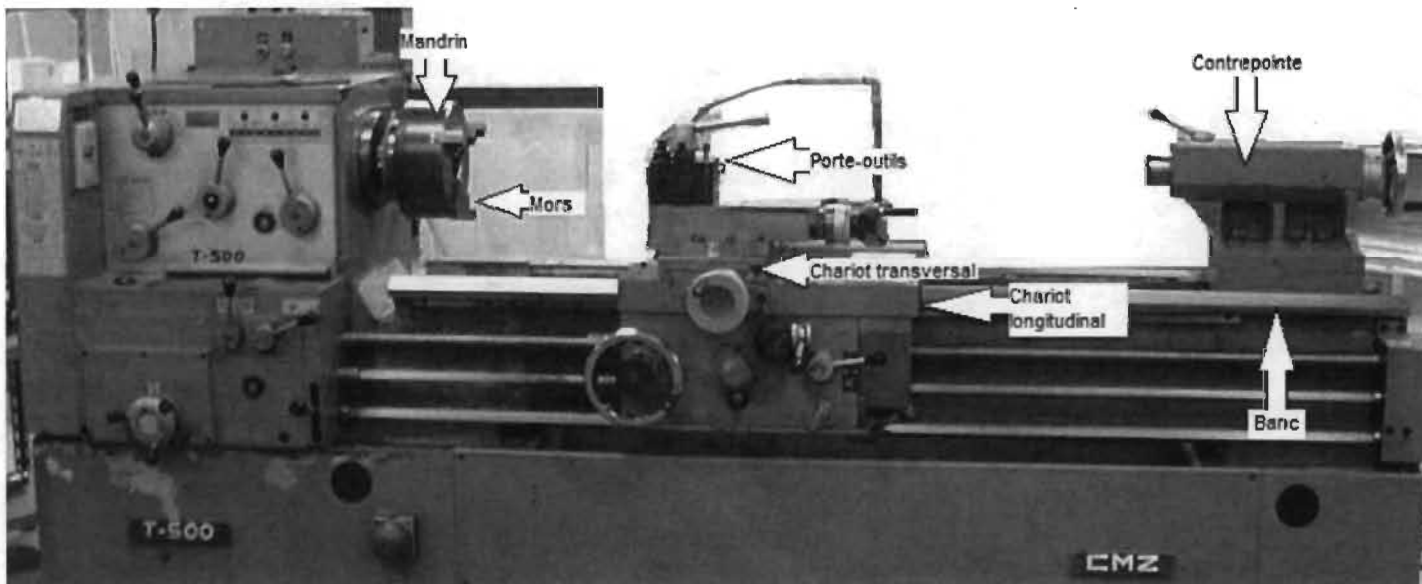
Outil d'expérimentation pour déterminer la variabilité de l'estimation de la probabilité et la facilité à choisir un niveau de l'échelle.

Scénario 3 - Tour conventionnel - A8.

L'image ci-dessous montre un tour conventionnel utilisé dans un atelier de fabrication mécanique. Il est normalement utilisé de une à deux heures par jour, par des techniciens d'usinage formés et avec des niveaux d'expérience variés.

Ceux-ci portent généralement leurs lunettes de sécurité dans l'atelier et l'application de cette mesure de sécurité est surveillée par la direction.

Lors de l'usinage, il peut arriver que des petits copeaux de métal soient projetés vers le technicien. Si un copeau atteignait l'œil du technicien, il pourrait entraîner une légère irritation de l'œil.



*** 17. En considérant une utilisation de cette machine durant les 5 prochaines années, quelle serait à votre avis la probabilité en % qu'un travailleur subisse cette blessure (une légère irritation de l'œil)?**

*** 18. L'échelle utilisée pour définir la probabilité ont rendu mon choix:**

- ☐ Très facile.
- ☐ Assez facile.
- ☐ Ni facile ni difficile.
- ☐ Assez difficile.
- ☐ Très difficile.

*** 19. Expliquer votre réponse précédente.**

7 / 38



18%

Préc.

Suiv.

*** 110. En considérant une utilisation de cette machine durant les 5 prochaines années, quelle serait à votre avis la probabilité qu'un travailleur subisse cette blessure (une légère irritation de l'œil)?**

- ☐ Très probable: presque certain de se produire, surviendra vraisemblablement dans la plupart des circonstances.
- ☐ Probable: peut se produire, surviendra probablement dans la plupart des circonstances.
- ☐ Possible: pourrait survenir.
- ☐ Improbable: occurrence possible, mais non anticipée.
- ☐ Rare: très improbable car près de zéro.

*** 111. Les définitions ou le nombre de niveaux de l'échelle utilisée pour définir la probabilité ont rendu mon choix:**

- ☐ Très facile.
- ☐ Assez facile.
- ☐ Ni facile ni difficile.
- ☐ Assez difficile.
- ☐ Très difficile.

*** 112. Expliquer votre réponse précédente (par exemple, la définition de la probabilité était-elle claire, était-il facile ou difficile de comprendre la signification des différents niveaux, le nombre de niveaux était-il adéquat, les termes utilisés étaient-ils vagues ou clairs, les informations fournies étaient-elles suffisantes?)**

38 / 38

100%

Préc.

Terminé

Annexe 5 : Documents utilisés pour l'expérimentation

CERTIFICAT D'ÉTHIQUE DE LA RECHERCHE AVEC DES ÊTRES HUMAINS

En vertu du mandat qui lui a été confié par l'Université, le Comité d'éthique de la recherche avec des êtres humains a analysé et approuvé pour certification éthique le protocole de recherche suivant :

Titre : Étude de la définition des paramètres de probabilité utilisés dans les outils d'estimation des risques en sécurité des machines

Chercheurs : Jose Angel Cardenas
Département de génie industriel

Organismes :

N° DU CERTIFICAT : CER-15-215-07.02

PÉRIODE DE VALIDITÉ : Du 14 septembre 2015 au 14 septembre 2016

En acceptant le certificat éthique, le chercheur s'engage :

- à aviser le CER par écrit de tout changement apporté à leur protocole de recherche avant leur entrée en vigueur;
- à procéder au renouvellement annuel du certificat tant et aussi longtemps que la recherche ne sera pas terminée;
- à aviser par écrit le CER de l'abandon ou de l'interruption prématurée de la recherche;
- à faire parvenir par écrit au CER un rapport final dans le mois suivant la fin de la recherche.


Maude Hébert

Présidente du comité


Fanny Longpré

Secrétaire du comité

Décanat de la recherche et de la création

Date d'émission : 14 septembre 2015

Courriel d'invitation à l'expérimentation

Bonjour,

Je me nomme José Angel Cardenas et je suis étudiant à la maîtrise en génie industriel. Dans le cadre de mon projet de recherche, je mène actuellement une étude expérimentale ayant pour but d'établir l'impact des différentes définitions possibles des paramètres de probabilité dans l'estimation des risques en sécurité de machines.

Je sollicite par la présente votre participation à cette étude. À terme, la collaboration de plusieurs ingénieurs comme vous, permettra de formuler des recommandations pour améliorer la définition des paramètres de probabilités dans les outils d'estimation de risques.

Pour l'expérimentation on utilisera un questionnaire dont une partie doit être répondue sur une plate-forme d'internet et l'autre partie de manière physique. Le questionnaire comprend quatre scénarios avec des images sur lesquelles nous vous demandons de faire l'estimation de la probabilité de blessure au travailleur. Le temps pour répondre au questionnaire est d'environ 60 minutes.

Je vous invite donc à communiquer avec moi (aux coordonnées ci-dessous) afin que nous puissions convenir d'un moment pour se rencontrer ou pour toute question concernant cette démarche.

Je vous remercie à l'avance de votre collaboration.

Très cordialement,

José Angel Cardenas G.

jose.angel.cardenas@uqtr.ca

Tél. : 819 841 3672



OBJET : Participation au projet de recherche : Étude de la définition des paramètres de probabilité utilisés dans les outils d'estimation des risques en sécurité des machines

Madame,

Monsieur,

L'utilisation des machines dans les différents domaines de l'industrie rend les opérateurs et les utilisateurs en contact constant avec les risques. Dans la province de Québec, des accidents impliquant des machines se produisent dans tous les secteurs de l'économie. La norme internationale ISO 12100 :2010 *Sécurité des machines - Notions fondamentales, principes généraux de conception*, propose un processus itératif d'appréciation et de réduction du risque, qui fournit les informations nécessaires pour concevoir des machines plus sûres.

L'estimation du risque est la troisième étape dans le processus d'appréciation du risque et consiste à déterminer le niveau ou l'indice de risque. Cette étape est très importante dans le processus parce qu'elle fournit l'information nécessaire à l'élaboration des mesures à prendre pour réduire le risque.

Au cours de la dernière décennie, des études ont été réalisées afin de recueillir des données sur un grand nombre **d'outils d'estimation du risque**. En particulier, ces études ont permis de démontrer que les définitions des niveaux de probabilité pouvaient grandement influencer les utilisateurs de ces outils. Or, l'état actuel de la recherche ne permet pas d'avoir une compréhension adéquate de l'impact de ces différentes définitions sur l'utilisation des outils d'estimation des risques.

Ainsi, nous sollicitons votre collaboration à titre de participant à cette étude. À travers un questionnaire, vous seriez appelé à estimer la probabilité de blessure à un travailleur pour différents scénarios d'accidents. Un exemple d'illustration est joint à la présente.

Il est à noter que ce projet est conforme aux exigences en matière d'éthique de la recherche de l'Université du Québec à Trois-Rivières et que toutes les informations recueillies seront dépersonnalisées et traitées avec la plus grande confidentialité.

À terme, la collaboration de plusieurs ingénieurs comme vous, nous permettra de formuler des recommandations pour améliorer la définition des paramètres de probabilité dans les outils d'estimation de risques.

Nous vous remercions à l'avance de votre collaboration et nous vous souhaitons nos salutations les meilleures.

José Angel Cardenas.
Chercheur responsable
Université du Québec à Trois-Rivières
Tél.: 819-841-3672
Jose.angel.cardenas@uqtr.ca

François Gauthier, ing. Ph. D.
Directeur de recherche
Université du Québec à Trois-Rivières.
Tél.: 819-376-5011 (poste 3959)
francois.gauthier@uqtr.ca



FORMULAIRE DE CONSENTEMENT

Engagement du chercheur.

Moi, **José Angel Cardenas**, m'engage à procéder à cette étude conformément à toutes les normes éthiques qui s'appliquent aux projets comportant la participation de sujets humains.

Consentement du participant.

Je, _____, confirme avoir lu et compris la lettre d'information au sujet du projet **Étude de la définition des paramètres de probabilité utilisés dans les outils d'estimation des risques en sécurité des machines**. J'ai bien saisi les conditions éventuelles de ma participation. On a répondu à toutes mes questions à mon entière satisfaction. J'ai disposé de suffisamment de temps pour réfléchir à ma décision de participer ou non à cette recherche. Je comprends que ma participation est entièrement volontaire et que je peux décider de me retirer en tout temps, sans aucun préjudice.

J'accepte donc librement de participer à ce projet de recherche.

Participante ou participant.

Chercheur.

Signature :

Signature :

Nom :

Nom :

Date :

Date :

Numéro de certificat : CER-15-215-07.02

Certificat émis le 14 septembre 2015

Exemple du questionnaire

Ce document présente un exemple du type des questions qui sont présentées aux participants à l'étude.

Section 1/3 : Questions sur information générale.

- a- Sexe.
- b- Âge.
- c- Domaine.
- d- Années d'expérience en ingénierie.

Section 2/3 : Questions pour l'estimation du risque.

2.1. En considérant une utilisation de cette machine durant les 5 prochaines années, quelle serait à votre avis la probabilité qu'un travailleur subisse cette blessure ?

- Très probable
- Possible
- Rare

2.2. En considérant une utilisation de cette machine durant les 5 prochaines années, quelle serait à votre avis la probabilité qu'un travailleur subisse cette blessure ?

- Très probable : presque certain de se produire, surviendra vraisemblablement dans la plupart des circonstances.
- Possible : pourrait survenir.
- Rare : très improbable car près de zéro.

2.3. En considérant une utilisation de cette machine durant les 5 prochaines années, quelle serait à votre avis la probabilité qu'un travailleur subisse cette blessure ?

- Très probable.
- Probable.
- Possible.
- Improbable.
- Rare.

2.4. En considérant une utilisation de cette machine durant les 5 prochaines années, quelle serait à votre avis la probabilité qu'un travailleur subisse cette blessure ?

- Très probable : presque certain de se produire, surviendra vraisemblablement dans la plupart des circonstances.
- Probable : peut se produire, surviendra probablement dans la plupart des circonstances.
- Possible : pourrait survenir.
- Improbable : occurrence possible, mais non anticipée.
- Rare : très improbable car près de zéro.

2.5. En considérant une utilisation de cette machine durant les prochaines années, quelle serait à votre avis la probabilité qu'un travailleur subisse cette blessure ?

- Une probabilité de 1 fois par 5 ans.
- Une probabilité de 1 fois par 25 ans.
- Une probabilité de 1 fois par 100 ans.

2.6. En considérant une utilisation de cette machine durant les prochaines années, quelle serait à votre avis la probabilité qu'un travailleur subisse cette blessure ?

- 2×10^{-1} par an.
- 1×10^{-1} par an.
- 4×10^{-2} par an.
- 2×10^{-2} par an.
- 1×10^{-2} par an.

2.7. En considérant une utilisation de cette machine durant les prochaines années, quelle serait à votre avis la probabilité qu'un travailleur subisse cette blessure ?

- Une probabilité de 1 fois par 5 ans.
- Une probabilité de 1 fois par 10 ans.
- Une probabilité de 1 fois par 25 ans.
- Une probabilité de 1 fois par 50 ans.
- Une probabilité de 1 fois par 100 ans.

2.8. En considérant une utilisation de cette machine durant les 5 prochaines années, quelle serait à votre avis la probabilité en % qu'un travailleur subisse cette blessure ?

2.9. En considérant une utilisation de cette machine durant les 5 prochaines années, la probabilité qu'un travailleur subisse cette blessure, est élevée.

- Tout à fait d'accord.
- D'accord.
- Ni en désaccord ni d'accord
- Pas d'accord
- Pas du tout d'accord

2.10. En considérant une utilisation de cette machine durant les 5 prochaines années, quelle serait à votre avis la probabilité qu'un travailleur subisse cette blessure ?

Vous devez marquer un « X » sur la ligne, pour définir la probabilité en tenant compte que le côté gauche correspond à une probabilité nulle (« Impossible ») et que le côté droit correspond à une probabilité de 1.0 (« Certain »).

Impossible

Certain

Section 3/3 : Questions d'opinion sur la facilité à choisir un niveau de l'échelle.

3.1. Les définitions ou le nombre de niveaux de l'échelle utilisée pour définir la probabilité ont rendu mon choix :

- Très facile.
- Assez facile.
- Ni facile ni difficile.
- Assez difficile.
- Très difficile.

3.2. Expliquer votre réponse précédente (par exemple, la définition de la probabilité était-elle claire, était-il facile ou difficile de comprendre la signification des différents niveaux, le nombre de niveaux était-il adéquat, les termes utilisés étaient-ils vagues ou clairs, les informations fournies étaient-elles suffisantes).

Information sur le fonctionnement des machines

Perceuse à colonne.

Une perceuse à colonne est une machine utilisée pour faire des trous cylindriques dans des pièces de différents matériels. La perceuse est normalement fixée sur un bâti, un établi ou au sol. Durant le perçage un moteur électrique fait tourner une mèche qui est fixée dans un mandrin. La vitesse de rotation de la mèche est réglable par l'intermédiaire d'un système de courroies et poulies. L'opérateur doit régler la vitesse de la mèche, fixer la pièce à percer sur la table de travail ou maintenir la pièce avec ses mains pendant le perçage.

Presse plieuse hydraulique.

Une presse plieuse hydraulique est une machine utilisée pour plier de la tôle ; elle est constituée d'un poinçon (partie supérieure mobile) et d'une matrice (partie inférieure fixe), en forme de V, de U, ou de tout autre forme selon le besoin. Durant le processus de pliage l'opérateur doit placer la tôle avec ses mains entre la matrice et le poinçon. Il doit actionner le système hydraulique avec la commande à pied pour faire descendre le poinçon et plier la tôle.

Tour conventionnel.

Le tour conventionnel est une machine utilisée pour usiner, par enlèvement de matière, une pièce généralement en rotation autour d'un axe, au moyen d'un outil de coupe que l'on déplace dans un plan passant par cet axe (Le petit Larousse 1999). La pièce à usiner est placée dans le mandrin et serrée par l'intermédiaire des mors. En tournage, le mouvement de coupe est obtenu par rotation de la pièce serrée entre les mors du mandrin, tandis que le mouvement d'avance est obtenu par le déplacement de l'outil de coupe en utilisant le chariot transversal et le chariot longitudinal. La combinaison de ces deux mouvements permet l'enlèvement de matière sous forme de copeaux.

Trancheuse à viande.

La trancheuse à viande est une machine à lame circulaire tournante servant à couper entre autres la viande, les charcuteries et les fromages. Durant le processus de découpage de la viande, l'opérateur doit poser le bloc de viande sur le chariot à viande et utiliser l'accessoire de pousse. Il doit ensuite démarrer la machine, et déplacer le chariot vers la lame. Les morceaux de viande coupés sortent à l'arrière de la machine (près de la lame en rotation) et sont pris par l'opérateur avec la main.