

Université de Montréal

Analyse bayésienne et élicitation d'opinions d'experts en analyse de risques
et particulièrement dans le cas de l'amiante chrysotile

par
Simon Pietrocatelli

Département de santé environnementale et de santé au travail
Faculté de médecine

Mémoire présenté à la Faculté des études supérieures
en vue de l'obtention du grade de Maître ès Sciences
en Santé environnementale et santé au travail
Décembre, 2008

© Simon Pietrocatelli, 2008

Identification du jury

Université de Montréal
Faculté des études supérieures

Ce mémoire intitulé:

Analyse bayésienne et élicitation d'opinions d'experts en analyse de risques et particulièrement dans le cas de l'amiante chrysotile

présenté par :
Simon Pietrocatelli

a été évalué par un jury composé des personnes suivantes :

Dr Claude Viau
Président-rapporteur

Dr Michel Camus
Directeur de recherche

Dr Kannan Krishnan
Membre du jury

Résumé

L'appréciation de la puissance cancérigène des fibres d'amiante chrysotile repose en grande partie sur des jugements subjectifs et incertains des experts et des analystes en raison des résultats hétérogènes et équivoques d'études épidémiologiques et toxicologiques sérieuses. L'approche probabiliste bayésienne en évaluation de risques peut formaliser l'impact des jugements subjectifs et de leurs incertitudes sur les estimations de risques, mais elle est encore peu utilisée en santé publique. Le présent travail examine la possibilité d'appliquer l'approche bayésienne dans une récente élicitation d'opinions d'experts pour estimer la toxicité du chrysotile, le degré de consensus et de divergence, ainsi que les niveaux d'incertitude des experts. Les estimations des experts concordaient assez bien sur la différence de toxicité entre chrysotile et amphiboles pour les mésothéliomes. Pour le cancer du poumon, les évaluations probabilistes étaient bien plus disparates. Dans ce cas, les jugements des experts semblaient influencés à différents degrés par des biais heuristiques, surtout les heuristiques d'affect et d'ancrage liés à la controverse du sujet et à l'hétérogénéité des données. Une méthodologie rigoureuse de préparation des experts à l'exercice d'élicitation aurait pu réduire l'impact des biais et des heuristiques sur le panel.

Mots clés : bayésien, amiantes, heuristique, expert, élicitation, toxicité, subjectivité

Abstract

Characterizing the carcinogenic potency of chrysotile asbestos fibres relies a great deal on subjective and uncertain judgements by experts and analysts, given heterogeneous and equivocal results of important epidemiological and toxicological studies. The probabilistic Bayesian approach in risk assessments quantifies these subjective judgements and their uncertainties, along with their impact on risk estimations, but it is rarely used in the public health context. This report examines how the Bayesian approach could have been applied to a recent elicitation of experts' opinions to estimate the toxicity of chrysotile asbestos, the degree of convergence and divergence, as well as the uncertainty levels of these experts. The experts' estimations on the relative toxicity of chrysotile and amphibole asbestos were similar in the case of mesothelioma. However, in the case of lung cancer, the heterogeneity of the studies resulted in diverging and incompatible probabilistic evaluations. The experts' judgements seemed influenced by heuristic biases, particularly the affect and anchor heuristics associated with a controversial topic and to heterogeneous data. If the elicitation process had been prepared following a rigorous methodology, these heuristics and biases could have been mitigated.

Key words : Bayesian, asbestos, heuristic, expert, elicitation, toxicity, subjectivity

Liste des tableaux

Tableau I : Type de risques traités par l'approche bayésienne en analyse de risque	p.16
Tableau II : Chrysotile Vs Amphiboles: Données de la littérature et opinions d'expertes	p.33
Tableau III : Tableau d'identification des heuristiques pour chaque experte	p.36
Tableau IV : Grille d'évaluation des heuristiques appliquées au panel d'expertes sur l'amiante chrysotile	p.43
Tableau V : Analyse des heuristiques affectant l'experte A	p.46
Tableau VI : Analyse des heuristiques affectant l'experte B	p.48
Tableau VII : Analyse des heuristiques affectant l'experte C	p.50
Tableau VIII : Analyse des heuristiques affectant l'experte D	p.52
Tableau IX : Analyse des heuristiques affectant l'experte E	p.54
Tableau X : Analyse des heuristiques affectant l'experte F	p.55

Liste des figures

Figure 1: Subdivisions des amiantes selon leur formule chimique	p.4
Figure 2: Aperçu des différents types d'amiantes	p.6
Figure 3: Concentrations des fibres d'amiantes dans 3 régions productrices du Québec au 20 ^{ième} siècle	p.9
Figure 4: Processus bayésien d'élicitation d'opinions probabilistes d'experts	p.25
Figure 5 : Graphique de distribution cumulative utilisée pour éliciter les opinions des experts du panel	p.31
Figure 6 : Opinions quantifiées de l'experte A	p.45
Figure 7 : Opinions quantifiées de l'experte B	p.47
Figure 8 : Opinions quantifiées de l'experte C	p.49
Figure 9 : Opinions quantifiées de l'experte D	p.51
Figure 10 : Opinions quantifiées de l'experte D	p.53
Figure 11 : Opinions des expertes regroupées	p.56
Figure 12: Diagrammes d'interaction des heuristiques	p.72

Table des Matières

Page titre	i
Identification du jury	ii
Résumé	iii
Abstract.....	iv
Liste des tableaux	v
Liste des figures.....	vi
Table des Matières	vii
Confidentialité et éthique	ix
Liste des abréviations	xi
1 Introduction.....	1
1.1 Objectifs et structure du mémoire.....	3
1.2 Caractérisation de l’amiante chrysotile	3
1.2.1 Effets sur la santé.....	7
1.2.2 Expositions aux fibres des amiantes	8
1.3 Incertitudes sur la toxicité des amiantes.....	10
1.4 Pertinence d’un changement d’approche pour évaluer la toxicité du chrysotile	11
1.5 L’analyse bayésienne en évaluation de risques toxicologiques	13
1.5.1 Recension d’applications de l’analyse bayésienne en évaluation de risques.....	13
1.5.2 Types d’application de l’évaluation bayésienne des risques	15
1.5.3 Organisations utilisant l’évaluation bayésienne des risques	15
1.5.4 Applicabilité de l’approche bayésienne au chrysotile	16
1.6 Principes et difficultés élémentaires des élicitations d’opinions probabilistes d’experts.....	17
1.6.1 Heuristique et biais influençant les experts	18
1.6.2 Calibrage	21
2 Méthodologie	23
2.1 L’élicitation bayésienne d’opinions probabilistes d’experts	24
2.1.1 L’étape préparatoire	26

2.1.2	L'élicitation des probabilités.....	27
2.1.3	L'étape d'analyse	29
2.2	Méthodologie appliquée à un panel d'expertes sur l'amiante chrysotile	30
2.2.1	Analyse des opinions des expertes	32
2.2.2	Critères d'identification des heuristiques	33
2.3	Critique bayésienne de la consultation d'expertes sur le chrysotile par Santé Canada	36
3	Résultats.....	38
3.1	Fonctionnement et composition du panel	39
3.2	Résultats du panel.....	41
3.3	Opinions des expertes.....	42
3.3.1	Opinions de l'experte A	45
3.3.2	Opinions de l'experte B	46
3.3.3	Opinions de l'experte C	49
3.3.4	Opinions de l'experte D	50
3.3.5	Opinions de l'experte E	52
3.3.6	Opinions de l'experte F.....	54
3.3.7	Estimations probabilistes regroupées.....	55
4	Discussion	58
4.1	Choix des expertes.....	61
4.2	Préparation de l'élicitation d'opinions et de probabilités	61
4.3	L'impact des biais et des heuristiques	63
4.4	L'approche bayésienne	66
4.4.1	Difficultés d'application au panel sur l'amiante chrysotile.....	70
5	Conclusion.....	75
	Bibliographie	79
	Annexes.....	xii
5.1	Annexe A : Revue des connaissances sur les applications de l'approche bayésienne.....	xiii
5.2	Annexe B : Exemple de démarche pour effectuer une analyse bayésienne rigoureuse	xx

Confidentialité et éthique

Le présent mémoire comporte des informations sur le profil, les débats et les conclusions d'un panel d'experts qui étaient provisoirement confidentielles, par décision fédérale, au moment du dépôt original. C'est pourquoi j'ai demandé à la Faculté des études supérieures (F.É.S.) de l'Université de Montréal un embargo de six mois avant la publication du mémoire. La F.É.S. m'a accordé cet embargo. Depuis, à la fin du mois de mars 2009, Santé Canada a décidé de rendre ces informations publiques avant la fin du mois d'avril. Dès que ces données seront publiées, je demanderai la levée de l'embargo.

Une partie du mémoire commente les attitudes et opinions des membres du panel. La confidentialité et l'intégrité des membres du panel et de ses participants n'étaient pas en cause dans l'observation du fonctionnement du panel et des attitudes, opinions et débats des membres du panel. En effet, toutes les informations utilisées ici sont contenues dans les rapports individuels et collectifs des membres du panel, les lettres de réserves individuelles ainsi que le procès-verbal détaillé des débats de la réunion du panel, documents qui devaient être et qui seront tous rendus publics. Les expertes avaient préalablement accepté - certaines avaient même exigé - dès la constitution du panel que tous les débats et les documents susmentionnés soient entièrement publics, et même que la réunion du panel se déroule devant des témoins du public. Ceci a d'ailleurs été rappelé par le représentant de Santé Canada au début de la réunion du panel,¹ dans

¹ « Dr. Camus reminded participants that he needed Declarations of Interest and summaries of their biographies before the end of the meeting. He also advised participants that the meeting was being recorded, but the tapes would not be made public. The Conference Publishers (Ottawa, Ontario) would use the tapes to generate a report of the meeting. The report will be submitted to participants for revisions before the final draft is produced for them to sign. Participants will be free to insert their own comments into the report if they disagree with any parts of it. »

l'invitation demandant aux panélistes de soumettre leurs rapports individuels² et dans un éditorial du président du panel rappelant que Santé Canada avait soumis aux panélistes un plan de travail indiquant que tous leurs travaux seraient rendus publics.³ Enfin, pour diminuer la personnalisation des commentaires, le mémoire n'identifie pas les panélistes. Le mémoire n'utilise aucun renseignement privilégié ou confidentiel ni aucune information de nature privée que ce soit, mais seulement des informations que les membres du panel avaient accepté de rendre publiques. En outre, le mémoire évite d'identifier les expertes individuelles concernées par des observations ou remarques spécifiques.

² Le document invitant les panelistes à compléter le rapport du panel par leurs rapports et commentaires individuels, intitulé *Final and Individual Contributions of members of Health Canada's Expert Panel on the Exposure-Response Characterization of Chrysotile Asbestos*, rappelait aux panelistes : « Please note that your individual reports will be publicly accessible. They could thus be read by other experts and by anyone in the public. »

³ Un éditorial (Ogden, 2009) du président du panel rappelait « The workplan provided to the panel by Health Canada said that the reports would be published on the Health Canada website, and in July 2008, the minister repeated that they would be published as soon as possible. »

Liste des abréviations

ABARI	Approches bayésiennes pour l'appréciation des risques
A/C	ratio Amphibole/chrysotile
ACGIH	American Conference of Governmental Industrial Hygienists
BEEP	Bayesian Elicitation of Experts' Probabilities
Cal-EPA	California Environmental Protection Agency
CITL	Center for Information Technology Leadership
CRIMP	Center for Research on Introduced Marine Pests
EHC	Environmental Health Criteria
f	Fibre
HEI	Health Effects Institute
HEI-AR	Health Effects Institute - Asbestos Review
Inserm	Institut national de la santé et de la recherche médicale
IRIS	Integrated Risk Information System
MRC	Medical Research Council
NHEXAS	National Human Exposure Assessment Survey
NIOSH	National Institute for Occupational Safety and Health
NRC	National Research Council
PIC	Prior Informed Consent
R	Risque
UK HSE	Health and Safety Executive
US EPA	United States Environmental Protection Agency
US NCHS	United States National Center for Health Statistics

1 Introduction

De 1980 à 1999, les organismes de santé publique évaluant la toxicité des fibres d'amiante ont attribué une toxicité identique aux fibres de chrysotile et aux amphiboles. Faute de pouvoir quantifier les incertitudes et d'avoir pu combiner des études équivoques, les évaluations ont adopté des postulats devant minimiser la probabilité de sous-estimer la toxicité du type d'amiante le plus utilisé, le chrysotile. Aujourd'hui, de nouvelles données épidémiologiques et toxicologiques se sont accumulées, on comprend mieux les mécanismes de toxicité, l'importance respective de la biopersistence et de la réactivité de surface des fibres a été démontrée et deux méta-analyses récentes ont conclu à une différence substantielle de toxicité entre le chrysotile et les autres amiantes. Néanmoins, la toxicité du chrysotile demeure controversée en raison de l'hétérogénéité des données empiriques. Le gouvernement du Canada a donc consulté en 2007 des experts représentant divers points de vue pour caractériser la cancérogénicité de l'amiante chrysotile et l'incertitude de cette quantification.

L'approche statistique « objective » en évaluation de risques ne permet ni de combiner quantitativement des connaissances qualitatives incomplètes, des études de biopersistence et des études *in vitro*, *in vivo* et épidémiologiques, ni de quantifier les incertitudes épistémiques sur les modèles dose-réponse et sur la validité des études scientifiques. Par contre, l'approche probabiliste « subjective » bayésienne permet de combiner des données qualitatives et quantitatives, subjectives et objectives, et de quantifier les incertitudes globales des estimations de risques (Procaccia *et coll.*, 2003).

L'approche bayésienne est-elle applicable en évaluation de risques toxicologiques, plus spécifiquement en élicitation d'opinions probabilistes d'experts, et comment aurait-on pu l'appliquer dans l'élicitation d'opinions d'experts sur la toxicité du chrysotile?

1.1 Objectifs et structure du mémoire

Le présent mémoire examine la pertinence et les modalités d'application de l'approche probabiliste bayésienne en évaluation de risques toxicologiques et en élicitation d'opinions probabilistes d'experts, en prenant pour cas une évaluation de la toxicité de l'amiante chrysotile par un groupe d'experts mandatés par Santé Canada.

Cette recherche exploratoire comporte un objectif de développement d'une expertise nouvelle dans le département de *Santé environnementale et santé au travail* et dans la *Chaire d'analyse et de gestions des risques toxicologiques* de l'Université de Montréal. Ce mémoire repose sur une recherche entièrement autonome portant sur la méthodologie bayésienne et sur l'élicitation d'opinions d'experts en évaluation de risques.

1.2 Caractérisation de l'amiante chrysotile

Le terme « amiante » ne désigne ni une entité ni une famille minéralogique. C'est un terme commercial désignant un groupe de six (6) silicates fibreux avec des propriétés et des applications industrielles analogues, mais appartenant à des groupes et des familles minéralogiques distincts (figure 1). Les différents types d'amiantes ont des caractéristiques physiques et chimiques très différentes.

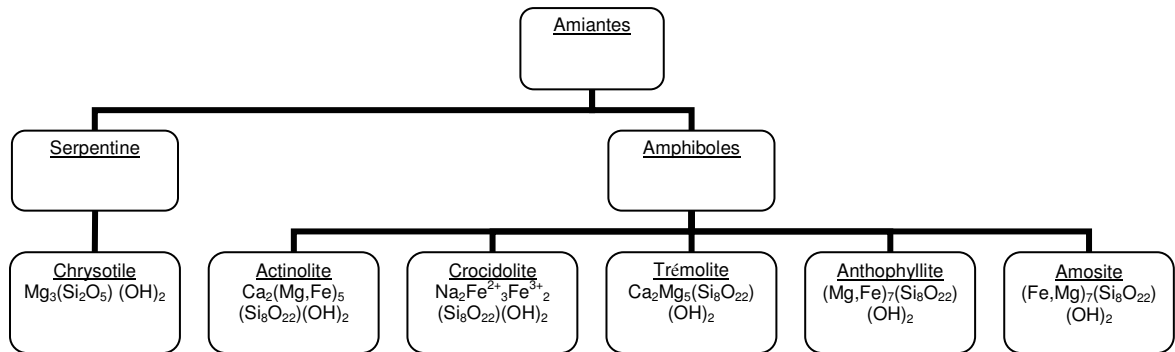


Figure 1 : Classement des amiantes selon leur formule chimique

L'amiante chrysotile est la seule forme fibreuse (asbestiforme) de la roche serpentine, un groupe minéralogique faisant partie de la famille des phyllosilicates. L'amiante chrysotile présente une structure cristalline, qui détermine la taille et la forme des fibres, en couches ou en feuilles superposées. Ces couches, composées de silice (Si_2O_5) et de brucite $\text{Mg}(\text{OH})_2$, se courbent pour former des cylindres appelés fibrilles. Ces dernières possèdent un diamètre compris entre 0,02 et 0,03 μm et un rapport longueur diamètre pouvant aller jusqu'à 100 :1 (Inserm, 1997).

Le deuxième groupe, les fibres amphiboles, incluent la crocidolite, l'amosite, l'anthophyllite et les formes fibreuses de la trémolite et de l'actinolite. Contrairement au chrysotile, les amphiboles comportent deux chaînes ou rubans basés sur des unités de Si_4O_{11} qui ne se replient pas sur elles-mêmes pour former des fibrilles. Toutes les fibres d'amphibole sont droites (aciculaires) et sont beaucoup plus grosses que les fibres de chrysotile, leur diamètre pouvant atteindre 1,5 μm dans le cas de l'amosite.

Toutes les fibres d'amiante sont résistantes aux bases fortes et à la chaleur, mais à des degrés divers, le chrysotile étant moins résistant que les autres

amiantes. En outre, le chrysotile est sensible aux acides, même faibles, qui réagissent avec les groupements hydroxyles (Inserm, 1997).

Le chrysotile est pratiquement le seul type d'amiante exploité et utilisé aujourd'hui et représente la majorité des anciens produits des amiantes que l'on retrouve encore dans les immeubles en Amérique du Nord (US EPA, 2007). Au cours du 20^e siècle, jusqu'à la fin des années 1980, les amphiboles représentaient 5-9% de la production totale d'amiante et étaient utilisées comme isolants et dans la fabrication d'amiante-ciment dans plusieurs pays dont le Canada (Virta, 2006). Par conséquent, le chrysotile représente environ 95% de l'amiante en place dans les immeubles d'Amérique du Nord aujourd'hui.

L'accumulation des données toxicologiques et épidémiologiques sur le danger des fibres d'amiante pour la santé humaine a entraîné un bannissement des fibres amphiboles dans les années 1980, puis du chrysotile à compter de 1996 environ, dans plusieurs pays dont l'Australie, la Nouvelle-Zélande, le Chili et plusieurs pays d'Europe (US EPA, 2007). Les pays qui produisent encore de l'amiante aujourd'hui comme le Canada, la Chine, la Russie, le Kazakhstan et le Brésil, ne produisent que de l'amiante chrysotile (British Geological Survey, 2008).

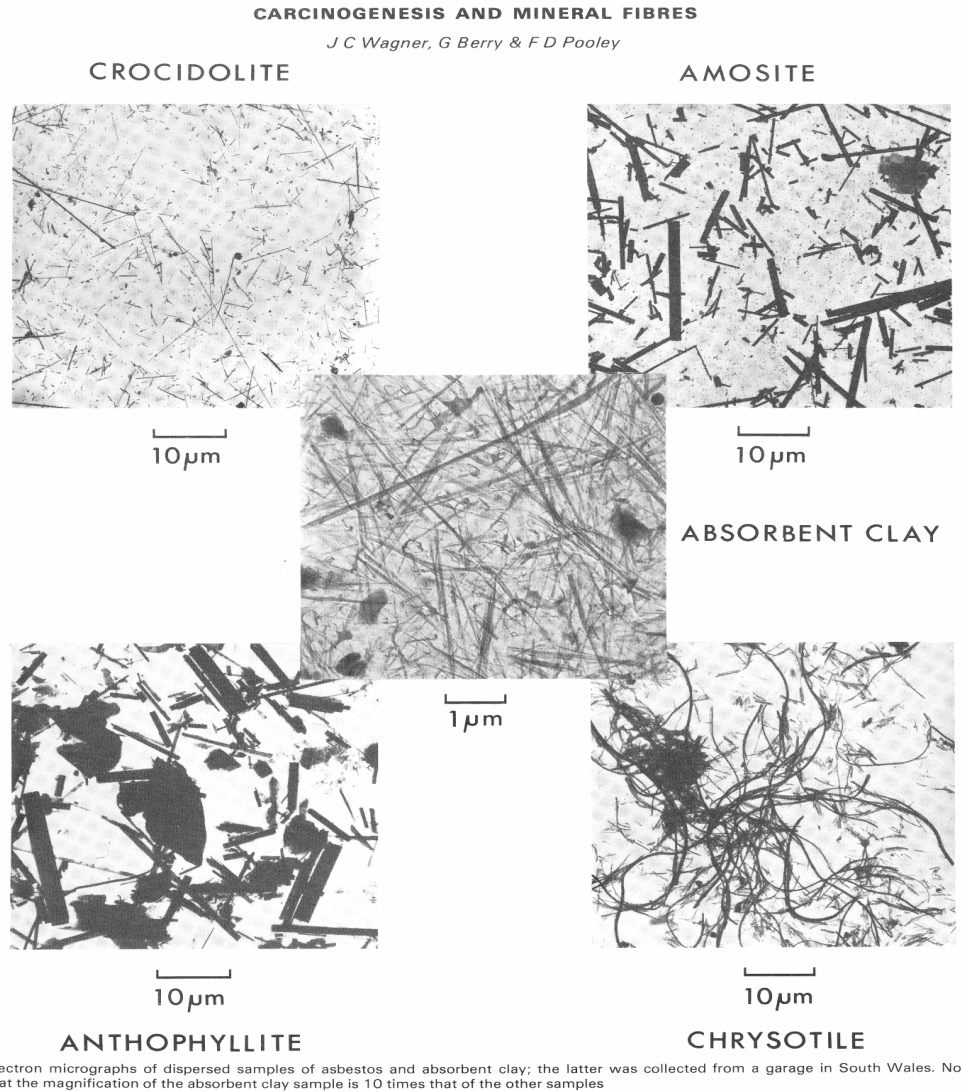


Figure 2 : Aperçu des différents types d'amiantes

(Wagner *et coll.*, 1980, reproduit avec la gracieuse permission du Oxford University Press)

En raison de ces différences, les amphiboles et le chrysotile ont eu des applications technologiques différentes. Les amphiboles sont plus résistantes à la chaleur et aux milieux chimiques agressifs. De plus, la rigidité des fibres amphiboles les rend moins malléables et donc moins facilement utilisables que les fibres de l'amiante chrysotile. Les différences ont aussi des implications toxicologiques : les fibres amphiboles sont rigides et en forme

d'aiguilles et pénètrent donc plus loin dans le système respiratoire, les amphiboles persistent aussi plus longtemps dans le poumon que le chrysotile qui est composé de fibres souples multicouches et frisées (figure 2)(Berman *et coll.*, 1995; Inserm, 1997; Berman et Crump, 2008a).

1.2.1 Effets sur la santé

Les amiantes ne constituent un risque pour la santé que si les fibres sont inhalées. Le risque dépend de plusieurs facteurs : de la concentration des fibres dans l'air, de la durée d'exposition, de la fréquence des expositions, de la taille des fibres d'amiante inhalées, du type minéralogique des fibres et du temps écoulé depuis l'exposition (Eastern Research Group, 2003). Avec une dose ou exposition cumulative suffisante, les fibres des amiantes peuvent causer l'amiantose (formation dans les poumons de tissus cicatriciels qui gênent la respiration), le cancer du poumon et le mésothéliome, une forme rare de cancer de la membrane séreuse pleurale du thorax ou de la membrane séreuse péritonéale de la cavité abdominale. En 2006, le cancer du larynx a été ajouté à cette liste par le National Academies of Sciences (Report from the Committee on Asbestos: Selected Health Effects, 2006). Il subsiste encore beaucoup d'incertitudes sur la relation entre l'exposition à l'amiante et d'autres types de cancer.

Le tabagisme, combiné à l'inhalation de fibres d'amiantes, augmenterait aussi fortement le risque de cancer du poumon (Santé Canada, 2007).

Les effets néfastes des amiantes restent, encore aujourd'hui, une inquiétude majeure en santé publique pour plusieurs raisons (Berman et Crump, 2008b). Premièrement, une quantité significative des amiantes et de produits dérivés se trouve encore sur le marché et on en retrouve aussi dans plusieurs immeubles (HEI-AR, 1991). De plus, comme la période de latence entre l'exposition et les effets sur la santé est très longue (plus de 10 ans), il est

probable que de nouveaux cas de maladies reliées aux amiantes surviennent dans un futur proche (Berman et Crump 2003, Eastern Research Group, 2003). Des roches renfermant des veines d'amiantes se retrouvent encore dans des secteurs densément peuplés (ex : collines El Dorado près de San Antonio en Californie) (Meeker *et coll.*, 2006). Enfin, l'emploi des fibres de chrysotile ou des produits contenant du chrysotile peut être mal ou non contrôlé.

1.2.2 Expositions aux fibres des amiantes

Les travailleurs des industries qui utilisent les amiantes font encore partie des gens les plus exposés aux fibres, même si ce chiffre a beaucoup diminué depuis quelques années (EHC *et coll.*, 1998) (figure 3). Dans les industries d'extraction des fibres d'amiante, les expositions sont maîtrisées et tournent autour de 0,6 f/mL, avec un plafond rarement dépassé de 1 f/mL. Selon l'EPA, des concentrations de fibres de 0,0004 f/mL dans l'air causeraient des excès de cancer de 1/10 000 lors d'une exposition chronique (US EPA, 2007).

Les personnes travaillant dans la construction, l'entretien et la rénovation de vieux immeubles peuvent être exposées de façon intermittente à des concentrations de fibres d'amiantes très élevées (plusieurs f/ml). En effet, d'anciens matériaux de construction (isolants, amiante-ciment, tuiles, etc.) encore en place dans les immeubles contiennent des fibres d'amiantes et plusieurs anciens isolants des amiantes sont friables. Ces travailleurs peuvent donc être surexposés à des fibres d'amiante chrysotile et amphiboles.

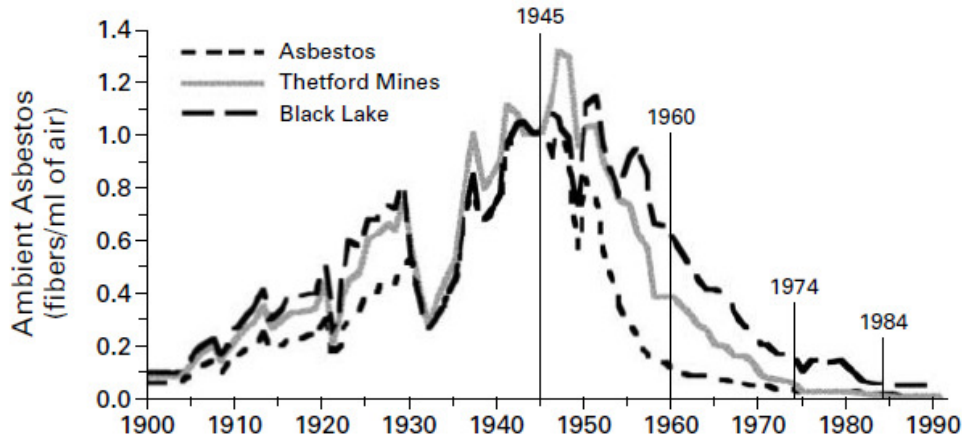


Figure 3 : Concentrations des fibres d'amiantes dans 3 régions productrices du Québec 20^{ième} siècle

(Camus *et coll.*, 1998, reproduit avec la gracieuse permission du New England Journal of Medicine)

Au Québec, dans les régions d'extraction minière de l'amiante chrysotile, on a estimé que les concentrations atteignaient en moyenne 1,0 f/mL dans les années 1950. Ces concentrations ont par la suite diminué progressivement pour atteindre moins de 0,1 f/mL dans les industries des amiantes aujourd'hui (Camus *et coll.*, 1998).

Les concentrations des fibres d'amiantes dans l'air ambiant des résidences, des villes, des régions rurales et de la plupart des immeubles, sont normalement très faibles (< 0,001 f/mL). Les expositions et les risques pour la population générale sont donc minimes. Les concentrations des amiantes dans l'air des régions rurales sont environ 10 fois plus faibles que celles dans l'air des grandes villes qui sont, pour leur part, environ 1 000 fois inférieures aux niveaux acceptés aujourd'hui dans les emplois liés aux amiantes (Santé Canada, 2007). Toutefois, on a noté des expositions relativement élevées à des mélanges d'amiantes dans certaines écoles vétustes et relativement mal entretenues.

Des fibres de l'amiante chrysotile peuvent se retrouver dans certaines sources d'eau. Cependant, les méthodes classiques de traitement de l'eau réduisent de façon importante les concentrations d'amiante et les fibres de chrysotile ingérées ne présenteraient pas un danger pour la santé (Doll et Peto, 1985).

1.3 Incertitudes sur la toxicité des amiantes

Plusieurs questions sur les mécanismes et les degrés de toxicité des différentes fibres d'amiantes demeurent, même après 60 ans d'études épidémiologiques et toxicologiques. Le débat est à la fois scientifique et politique, car les incertitudes des analyses de risques entraînent des incertitudes dans la gestion de ces risques. Le débat a été ravivé récemment, en octobre 2006, à la troisième Conférence des parties à la Convention de Rotterdam, lorsqu'il a été proposé d'ajouter le chrysotile à la liste des substances soumises à la procédure de consentement préalable en connaissance de cause (appelée communément « procédure PIC »). Le gouvernement canadien s'y est opposé (Secrétariat de la Convention de Rotterdam, 2008) en arguant que le chrysotile est bien moins toxique que les autres amiantes, que la plupart des anciennes études épidémiologiques sur les amiantes ne faisaient pas de distinction entre les amiantes amphiboles et l'amiante chrysotile et que des revues de littérature et des méta-analyses récentes reconnaissent que ces deux types d'amiante peuvent avoir des toxicités très différentes (Berman et Crump, 2003; Hodgson et Darnton, 2000; Berry, 1997).

Bien que la plupart des scientifiques admettent que le chrysotile soit moins toxique que les amphiboles, les relations exposition-risques pour le chrysotile et les amphiboles et le degré de différence de toxicité entre les fibres des amiantes demeurent incertains et controversés.

1.4 Pertinence d'un changement d'approche pour évaluer la toxicité du chrysotile

L'analyse de risques comporte traditionnellement quatre étapes : 1) l'identification du danger, 2) la caractérisation de la toxicité (relation dose-réponse), 3) l'estimation des expositions dans la ou les populations ciblées et 4) la caractérisation du risque et des incertitudes dans ces populations (Report from the Committee on Non-Occupational Health Risks of Asbestiform Fibers, 1984; Gérin *et coll.*, 2003). Si une des étapes comporte des données insuffisantes ou controversées, on demande habituellement à des experts de les compléter et de les valider (Morgan et Henrion, 1990). La caractérisation de la puissance toxique du chrysotile correspond à la deuxième phase des évaluations de risques, et Santé Canada a eu recours à un panel d'experts indépendants et externes en raison de l'hétérogénéité des études épidémiologiques et toxicologiques et des controverses sur la validité des études et des méta-analyses. Mais l'approche classique en évaluation des risques suffit-elle dans le cas des amiantes?

L'approche classique en évaluation de risques repose sur l'approche statistique « objective » « fréquentiste ». Cette approche ne peut estimer la relation exposition-risques qu'à partir d'observations statistiques dans des études épidémiologiques ou toxicologiques. L'approche classique ne peut pas prendre en compte quantitativement et probabilistiquement les données qualitatives telles que les connaissances mécanistes, les limites des études scientifiques et les incertitudes des modèles, que l'on appelle « incertitudes épistémiques » (O'Hagan *et coll.* 2006).

Dans le cas de l'évaluation de la toxicité des fibres d'amiante chrysotile, la grande hétérogénéité des études *in vitro*, *in vivo* et épidémiologiques et entre les divers types de fibres et les types d'effets sur la santé étudiés rend leur validité et leur interprétation bien plus incertaines que les erreurs statistiques ne laisseraient croire. L'illustration en est que les controverses scientifiques

sur les amiantes sont encore très intenses. De plus, en raison de la méconnaissance des mécanismes de toxicité à différentes doses, les modèles d'analyses statistiques comportent de grandes incertitudes épistémiques (existence d'un seuil de toxicité, saturation à fortes doses, interactions avec des particules fines, etc.). Par ailleurs, les mécanismes de toxicité peuvent contribuer à discriminer entre des études épidémiologiques contradictoires. Les données *in vitro* et les études de biopersistence ne donnent pas directement des estimations du risque mais peuvent donner plus ou moins de poids et de validité à telle ou telle autre étude épidémiologique ou toxicologique. La plupart des études épidémiologiques ont très mal contrôlé l'effet du tabagisme sur le risque de cancer du poumon et elles ont utilisé des mesures d'expositions diverses et approximatives, etc. Toutes ces incertitudes impliquent beaucoup de subjectivité dans la caractérisation de la toxicité et dans l'estimation des risques, puisque des analystes et des experts différents peuvent aboutir à des conclusions opposées à partir des mêmes données scientifiques.

Le problème d'une évaluation classique de la toxicité du chrysotile ne découle pas tant de la subjectivité des experts ou des analystes, mais plutôt du fait que les incertitudes des experts liées à cette subjectivité ne sont ni caractérisées ni quantifiées dans les évaluations de risques classiques. De plus, les experts n'admettent pas et ne maîtrisent pas adéquatement leurs propres biais et incertitudes, ce qui nuit à l'objectivation des analyses (Morgan et Henrion, 1990; O'Hagan *et coll.*, 2006).

Une approche moins conventionnelle et moins utilisée en évaluation de risques permet d'intégrer des connaissances qualitatives ou subjectives et toutes les incertitudes aux observations empiriques quantitatives : l'approche bayésienne. Toutefois, l'approche bayésienne n'étant pratiquement pas utilisée dans les évaluations de risques en santé publique, la légitimité d'une nouvelle approche, « subjective » de surcroît, est à démontrer. Qui l'utilise en évaluation de risques sanitaires, comment et dans quelles circonstances?

1.5 L'analyse bayésienne en évaluation de risques toxicologiques

Au 18^{ième} siècle, Thomas Bayes démontra un théorème basé sur les probabilités conditionnelles, qui, contrairement à la statistique fréquentiste, permet d'estimer la probabilité qu'une hypothèse soit vraie relativement aux connaissances disponibles. Cela permet une modélisation dynamique itérative des données et l'accumulation de connaissances (« croyances ») servant de nouvelles hypothèses à leur tour. En utilisant son théorème, il est possible de réviser continuellement les probabilités d'un modèle ou d'un risque avec l'arrivée de nouvelles observations. De plus, cette approche permet de combiner des données qualitatives subjectives et des données quantitatives objectives dans une même estimation probabiliste des risques, tout en quantifiant les incertitudes liées à ces données et connaissances.

Les sociétés privées et parapubliques utilisent l'analyse bayésienne des risques depuis quelques décennies en finance (investissements, assurances), en ingénierie, en marketing et aussi en évaluation d'impacts environnementaux. On se sert surtout de l'approche probabiliste bayésienne dans les cas d'événements très rares (ex : sécurité de centrales nucléaires) ou peu documentés empiriquement (ex : solidité d'un site de construction donné), c'est-à-dire quand il y a peu de données quantitatives, car ces circonstances excluent forcément l'approche statistique fréquentiste.

1.5.1 Recension d'applications de l'analyse bayésienne en évaluation de risques

Les publications scientifiques et les sites Internet ont été examinés pour savoir quelles étaient les applications courantes de l'analyse bayésienne en analyses de risques. Le but était d'identifier les facteurs justifiant ou

favorisant l'emploi de l'approche bayésienne en évaluation de risques. Outre les revues spécialisées en toxicologie, en épidémiologie et en évaluation de risques, les sites Internet d'organismes se spécialisant dans les analyses bayésiennes de risques (ex : Agena, Netica, WinBUGS, VOSE, le Projet BEEP) et les sites de grandes agences de santé publique (ex : US-EPA, Cal.-EPA, Inserm, UK-HSE, Santé Canada, NIOSH, IRIS) ont été consultés. Ce n'est pas une revue de la littérature exhaustive, mais plutôt une recension des applications et des sources aisément accessibles et récentes, qui permet d'avoir un aperçu d'analyses de risques typiques employant une approche bayésienne

Des recherches dans les bases de données *Pubmed* et *Medline*, ainsi que dans divers moteurs de recherche comme *Google Scholar*, ont été effectuées avec les mots-clés suivants (en anglais et en français) : Analyse bayésienne, Approche bayésienne, Santé ET Bayes, Évaluation de risques ET Bayes, Évaluation des risques ET Santé, Élicitation ET Bayes, Élicitation ET Santé. Ensuite, les sites internet ont été recensés de façon semblable, en plus d'un examen approfondi des sites d'organismes gouvernementaux et parapublics importants en santé publique, et des sites internet de centres de recherche utilisant ou proposant l'analyse bayésienne de risques.

- 250 articles et sites internet mentionnant l'analyse bayésienne portaient sur une évaluation de risque et avaient été publiés entre 1988 et 2007.
- De ces 250, 34 articles et 17 sites internet montraient des applications bayésiennes concrètes en évaluation de risques.
- D'autres articles traitaient de méthodologie et de la théorie de l'approche bayésienne en évaluation des risques.

1.5.2 Types d'application de l'évaluation bayésienne des risques

On peut classer les 34 articles retenus selon les « types de risques » auxquels l'approche bayésienne a été appliquée. En croisant deux dimensions dichotomiques du risque, *l'acuité* et la *rareté* de l'effet, on obtient 4 types de risques (tableau I). Les « effets aigus » durent moins de trois mois, selon la définition du US-NCHS. Les effets de longue durée ou « chroniques » sont les effets sur la santé qui durent plus de trois mois.

La rareté ou la probabilité des effets peut être représentée comme le nombre de fois que l'effet surviendrait, en moyenne, au cours de la vie des membres d'une population donnée. Si la probabilité de survenir au cours d'une vie est plus grande que 1/10 000, on dira que le risque est « probable ». Si la probabilité est plus faible, on dira que ce risque est « rare ». Ces critères sont subjectifs et rudimentaires, mais on dispose de peu de cas (34) et ils peuvent donner une première approximation des caractéristiques des risques auxquels l'approche bayésienne est appliquée.

Sur 34 articles, 15 faisaient mention d'événements « rares », tandis que 19 ont été classés « événements fréquents ». Par ailleurs, 11 articles traitaient d'effets « aigus » et 23 d'effets « chroniques ». Il est intéressant de voir dans le tableau 1 que l'approche bayésienne a été appliquée dans une proportion non négligeable à chacun des quatre types de risques tels que définis.

1.5.3 Organisations utilisant l'évaluation bayésienne des risques

Qui utilise l'approche bayésienne en évaluation de risques toxicologiques? La plupart des 34 articles retenus proviennent de recherches effectuées dans des universités ou des centres de recherche privés (voir annexe A, tableau A-1). Trois articles ont été écrits ou commandités par un organisme de santé publique (Steventon *et coll.*, 2006; Walker *et coll.*, 2001, 2003). Les

applications dans le domaine de la santé étaient des études cliniques, la santé publique, la météorologie de catastrophe, les changements climatiques, la génétique et l'écologie.

On peut aussi considérer les types de données *a priori* (connaissances ou attentes de départ auxquelles l'analyse bayésienne ajoute des données objectives) utilisées pour évaluer les risques. Si ces *a priori* étaient des opinions d'experts on dira qu'ils étaient *subjectifs*, sinon on dira qu'ils étaient *objectifs*. Sur les 34 articles ci-haut mentionnés, 15 évaluations de risques partaient d'*a priori* subjectifs, c'est-à-dire des opinions d'experts, et 20 utilisaient de l'information *a priori* basée sur des données observées ou expérimentales seulement (un article a utilisé des *a priori* objectifs et subjectifs).

Tableau 1 : Type de risques traités par l'approche bayésienne en analyse de risque

		Acuité du risque	
		R aigus et rares: 6	R chroniques et rares: 9
Rareté du risque		R aigus et fréquents: 5	R chroniques et fréquents: 14

1.5.4 Applicabilité de l'approche bayésienne au chrysotile

Santé Canada n'utilise pas encore l'analyse bayésienne en évaluation de risques. Toutefois, la recension montre que quelques agences de santé publique telles que NIOSH (Ramachandran, 2008) et le California Department of Health Services (Neutra *et coll.*, 2002) commencent à se tourner vers l'analyse bayésienne pour évaluer les expositions et les risques toxicologiques (Creely *et coll.*, 2005; Tielemans *et coll.*, 2007).

Toujours d'après notre recension, l'approche bayésienne s'applique à des effets chroniques et peut donc s'appliquer aux cancers pulmonaires et aux mésothéliomes induits par les fibres d'amiantes et cela, que ces effets soient fréquents (expositions élevées et risques probables) ou rares (expositions faibles et risques improbables).

Enfin, les applications bayésiennes à des risques toxicologiques ou à l'évaluation d'expositions peut impliquer une élicitation d'opinions d'experts ou non.

« A priori », donc, l'analyse bayésienne peut s'appliquer à l'élicitation d'opinions d'experts par Santé Canada sur la caractérisation du risque de l'amiante chrysotile.

1.6 Principes et difficultés élémentaires des élicitations d'opinions probabilistes d'experts

En évaluation de risques bayésienne, on consulte habituellement des experts pour leur demander de donner leur propre distribution de probabilités subjectives qu'une variable ou qu'un risque prenne diverses valeurs. On élicite normalement les opinions d'experts à la pointe de domaines d'études complémentaires pour s'assurer que les modèles et les données utilisés pour analyser un risque soient valides, complets et représentent les connaissances les plus récentes.

Cependant, l'élicitation d'opinions d'experts en analyse de risques comporte des difficultés : désaccords et rivalités possibles entre experts, difficulté de combiner des champs d'expertise hétéroclites, incompréhension des autres champs d'expertise, incompréhension des probabilités et incohérence des estimations probabilistes élicitées, biais heuristiques inconscients,

subjectivité, influence inégale de différents experts, pressions sociopolitiques, biais venant d'attitudes face à la gestion du risque, etc. (O'Hagan *et coll.*, 2006)

Différents biais peuvent affecter les opinions et les jugements d'experts. Un des plus notoires est le conflit d'intérêts. L'opinion d'un expert peut être influencée inconsciemment par un conflit d'intérêts, mais l'expert pourrait aussi manquer d'intégrité et exprimer une opinion différente de ce qu'il pense vraiment pour favoriser un bénéfice personnel. Cependant, des mesures limitent ou rendent explicites ces conflits d'intérêt ou leur portée dans un processus de consultation d'experts.

Plus subtilement et plus généralement, ce sont des biais intellectuels cognitifs naturels qui affectent inconsciemment la pensée même des experts. De tels réflexes obscurs ou « intuitifs » influencent particulièrement l'élicitation de probabilités subjectives qui, par définition, est naturellement « imprécise », « approximative », « incertaine » et donc un peu spéculative. L'obtention de probabilités et d'opinions sur des probabilités est donc un processus de raisonnement approximatif et non rigoureux. Au lieu d'algorithmes logiques et mathématiques précis, nous sommes dans l'obligation de recourir à des approximations, des analogies et des raccourcis mentaux dits « heuristiques ». C'est ce type de processus mental et les biais qu'ils peuvent causer qui font l'objet du présent travail.

1.6.1 Heuristique et biais influençant les experts

Malgré leur compétence et leurs connaissances approfondies, les experts ne sont pas à l'abri de biais propres aux opinions et jugements probabilistes (Procaccia *et coll.*, 2003; O'Hagan *et coll.*, 2006). Tout le monde, incluant les experts, utilise des heuristiques lorsqu'on leur demande d'estimer une probabilité. Les heuristiques sont des raccourcis mentaux qui permettent de

prendre en considération seulement une partie des faits pour accélérer le processus de la pensée et émettre une opinion probabiliste. Contrairement aux algorithmes mathématiques rigoureux mais longs, les heuristiques servent à arriver rapidement à une solution ou à une estimation approximative et satisfaisante, tendant vers celle qui est optimale sans jamais l'atteindre. Tversky et Kahneman (1974) ont démontré que ces raccourcis, ou trucs, utilisés instinctivement sont relativement efficaces lorsque les personnes n'essayent pas de déterminer une probabilité de façon précise ou lorsqu'il y a peu de temps pour répondre. Toutefois, ces heuristiques peuvent aussi biaiser fortement les jugements d'experts si ceux-ci ne s'avisent pas de les éviter ou de les limiter. Il existe plusieurs types d'heuristiques en psychologie cognitive, mais quatre types sont particulièrement communs et utilisés lors d'un processus d'élicitation de probabilités subjectives : 1) l'affect, 2) l'ancrage et l'ajustement, 3) la disponibilité et 4) la représentation. (O'Hagan *et coll.*, 2006; Tversky et Kahneman, 1974)

1) L'heuristique de l'*affect* désigne le processus par lequel les jugements des experts sont influencés ou déterminés par leurs émotions. Leur jugement peut être biaisé positivement ou négativement selon leur perception de l'évènement et de ses implications et selon leur attitude personnelle face à cet événement et ses implications. Les implications touchent la sphère de la *gestion des risques*; ainsi l'opinion d'un expert sur l'évaluation du risque peut facilement être influencée par son attitude face aux conséquences perçues de l'évaluation du risque sur la gestion du risque. Le conflit d'intérêts est un autre des nombreux déterminants possibles de l'heuristique de l'affect, et il implique aussi, habituellement, l'impact de l'évaluation sur la gestion du risque.

Exemple : Un expert pourrait sous-estimer la probabilité d'une maladie causée par l'exposition à un contaminant s'il craignait qu'une estimation élevée entraîne des fermetures d'usines ou s'il était lui-même rémunéré par des propriétaires de ces usines. Au contraire, il pourrait tendre à surestimer

cette probabilité s'il craignait d'être décrié par ses pairs ou par des groupes luttant contre les impacts du contaminant en question.

2) L'heuristique d'*ancrage et d'ajustement*, comme son nom l'indique, désigne un phénomène qui incite les personnes à s'ancrer à leur première expérience et opinion du phénomène (ex : leur première étude exposition-effets) en ne s'ajustant pas assez aux nouvelles informations pertinentes ou aux informations extérieures (ex : d'autres études menées par d'autres chercheurs) à l'évènement en question.

Exemple : Un expert pourrait s'ancrer aux résultats de ses propres expériences et ne pas assez ajuster son opinion lorsque de nouvelles études sont publiées ou lorsque des études sont publiées par des groupes scientifiques qu'il ne connaît pas ou qu'il perçoit comme « moins scientifiques » que son propre milieu.

3) L'heuristique de *disponibilité* est un raccourci mental tenant compte seulement des faits les plus récents ou surestimant leur importance en raison de leur « disponibilité » en mémoire, puisqu'on peut y accéder plus rapidement et plus facilement. Présentée autrement, c'est une heuristique qui élimine les faits et informations plus anciens, souvent en ne cherchant pas assez profondément et systématiquement dans le passé.

Exemples : 1) Les médias peuvent rapporter des faits concernant une maladie de façon fréquente et répétitive qui donnent l'impression que la probabilité de contracter cette maladie est plus élevée qu'en réalité. 2) Les études dont les résultats sont plus dramatiques tendront à marquer la mémoire plus fortement que les études dont les résultats sont négatifs. 3) Les études publiées plus récemment seront plus accessibles au souvenir.

4) Enfin, l'heuristique de *représentation* aurait aussi pu être appelée l'heuristique *d'association* puisqu'elle consiste à estimer la probabilité d'un

événement en se basant sur la probabilité d'un autre événement qui lui est associé ou similaire.

Exemple : Extrapoler des données d'un événement associé à un échantillon de personnes de notre entourage à la population générale est un exemple d'utilisation de l'heuristique de représentation. En recherche, il s'agit souvent du biais consistant à généraliser exagérément à une population générale des observations obtenues sur une population particulière ou des circonstances particulières.

Il faut noter que ces heuristiques peuvent souvent se combiner, se confondre ou se renforcer mutuellement.

1.6.2 Calibrage

Cette étape fait partie d'une méthodologie bayésienne rigoureuse. En effet, la nécessité et l'efficacité d'un calibrage a été démontrée dans le passé dans plusieurs études dans le domaine de la psychologie (Murphy et Winkler 1974, 1977; Lichtenstein et Fischhoff, 1980). Le problème est que les experts, peu importe la méthodologie d'élicitation utilisée, sont généralement trop confiants dans leur estimation probabiliste. Ceci se traduit par une tendance à sous-estimer la valeur des queues de la distribution (Morgan et Henrion, 1990).

On doit habituellement confronter les probabilités subjectives d'un expert à ses heuristiques, à d'autres estimations probabilistes vérifiables pour le même expert et aux estimations d'autres experts, discuter avec l'expert des contradictions possibles, et l'amener à faire des ajustements nécessaires pour maximiser sa cohérence scientifique et l'objectivité de ses probabilités. C'est un long processus rétroactif d'essais-erreurs qui vise à réduire l'impact des biais heuristiques. On ne peut pas les éliminer complètement.

Cependant, avec un calibrage adéquat, ces biais peuvent être réduits. Le meilleur exemple de l'efficacité du calibrage provient du domaine de la météorologie. Murphy et Brown (1984) ont démontré que les météorologues se sont grandement améliorés dans leurs estimations probabilistes depuis 1960 grâce au « feedback » continu et à la régularité de leurs tâches. Plus récemment, l'équipe du projet BEEP inclut aussi dans leur méthodologie l'utilisation du calibrage (« training », « fitting and feedback ») (voir annexe B). Par contre, les élicitations en analyses de risques toxicologiques ne s'étendent habituellement pas sur plusieurs années, d'où l'importance d'avoir une méthodologie rigoureuse.

2 Méthodologie

La démarche de Santé Canada dans l'évaluation de la toxicité du chrysotile par un groupe d'experts s'est faite indépendamment de ce projet et n'impliquait pas une élicitation bayésienne systématique. Toutefois, un aspect de la consultation du groupe d'experts comprenait une élicitation de probabilités subjectives. J'ai pu observer la réunion d'experts, qui était conventionnelle. C'est donc essentiellement *a posteriori* et indirectement que j'ai pu analyser le processus. Cette étude est donc incomplète et ne constitue qu'une analyse critique *a posteriori*.

Le présent chapitre du mémoire expose les étapes d'un processus d'élicitation bayésienne d'opinions probabilistes d'experts tel qu'il aurait dû être mené si telle avait été l'approche de Santé Canada. J'ai aidé à la conception et à la formulation de l'élicitation des probabilités rédigée par Dr Michel Camus et j'ai développé une « grille de caractérisation heuristique » pour caractériser les heuristiques et les biais potentiels des opinions probabilistes des experts en fonction de la problématique particulière des connaissances, des limites des données et des controverses préalables sur la toxicité de l'amiante chrysotile. Enfin, j'ai conçu le protocole d'application de cette grille en fonction d'un des objectifs de Santé Canada qui était de caractériser la toxicité relative du chrysotile comparée à celle des amiantes amphiboles.

2.1 L'élicitation bayésienne d'opinions probabilistes d'experts

Dans le contexte de la santé publique et environnementale, l'approche bayésienne consiste à obtenir des experts des estimations de probabilités statistiques de certains impacts sur la santé, en se basant sur les connaissances générales, sur les effets de ces types de contaminants ou

d'événements et sur des données observées spécifiques. Cette approche permet ensuite une mise à jour des analyses avec l'arrivée de nouvelles informations (Procaccia *et coll.*, 2003). Adams (2006), semblablement à la méthodologie utilisée par l'équipe du BEEP (voir annexe B), ont divisé ce processus en 3 grandes étapes : l'étape préparatoire, l'étape d'élicitation et l'étape d'analyse (figure 4).

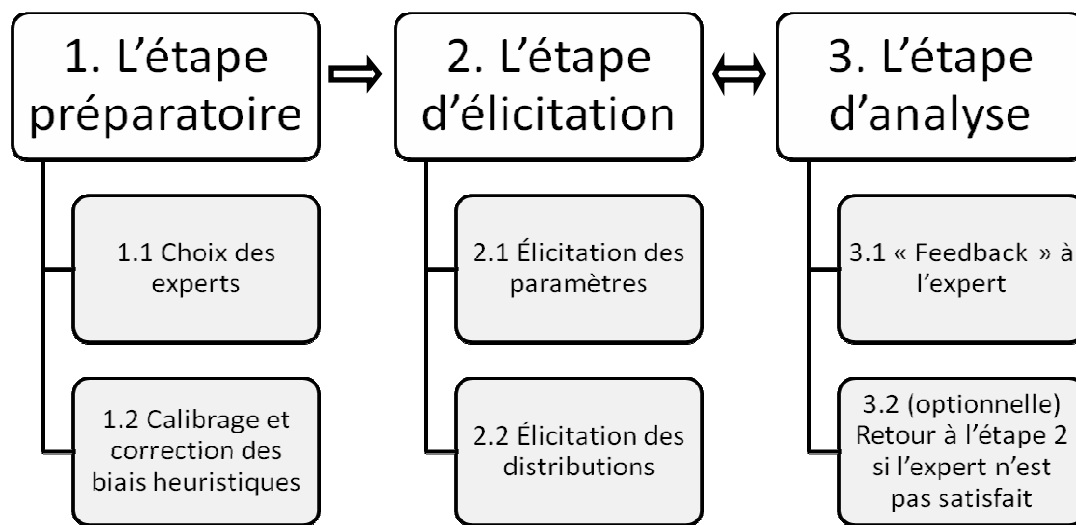


Figure 4 : Processus bayésien d'élicitation d'opinions probabilistes d'experts

2.1.1 L'étape préparatoire

Cette étape, comme son nom l'indique, précède et prépare l'élicitation des opinions. Elle comporte deux phases : le choix des experts et le calibrage des experts.

Plusieurs définitions existent pour déterminer ce qu'est un expert et ce qui le différencie de la population générale, mais celle de Wood et Ford (1993) résume bien ce que l'on entend par « expert ». Ils décrivent un expert comme une personne capable de résoudre des problèmes en se basant 1) sur les données d'un cas spécifique, 2) sur les principes généraux du domaine, 3) sur des stratégies de résolution connues dans le domaine et 4) sur les connaissances procédurales ou de relation (l'expert va créer des liens entre les études et les données au lieu de les traiter indépendamment). En d'autres mots, un expert doit avoir plus d'expérience et de compétence dans son domaine d'expertise que la population générale.

Il faut aussi considérer deux caractéristiques importantes lors du choix d'experts : l'interdisciplinarité et la diversité d'opinions (Morgan et Henrion, 1990). En effet, il est de plus en plus difficile de résoudre un problème en se basant sur l'expertise d'un seul domaine scientifique. La complexité croissante des questions en évaluation des risques ainsi que la spécialisation de plus en plus pointue des connaissances justifient le besoin d'avoir des experts de champs de compétence différents et complémentaires. De plus, pour s'assurer d'avoir des opinions qui représentent assez objectivement tous les aspects du problème, l'état des connaissances scientifiques et tous les courants de pensée dans un domaine, la diversité d'opinions est préconisée. Faute d'une certaine représentativité, la validité de l'élicitation sera compromise.

Les experts doivent recevoir une « formation » en estimation de probabilités pour que leurs jugements soient bien calibrés et le moins biaisés possible. Un autre objectif est aussi d'assurer une réelle compréhension des principes des probabilités, particulièrement des probabilités cumulatives et des probabilités des extrémités des distributions. Le calibrage d'un expert, ou la capacité d'estimer une probabilité avec précision, est une aptitude qui peut s'améliorer avec la pratique (Tversky et Kahneman, 1974; Morgan et Henrion, 1990; O'Hagan *et coll.*, 2006; Procaccia *et coll.*, 2003). Pour ce faire, les experts doivent se pratiquer en estimant des probabilités qui leur sont inconnues, mais qui sont connues par le décideur. À l'aide d'un processus de « rétroaction », les experts apprennent de leurs erreurs et augmentent la précision de leurs estimations. De plus, les experts doivent être sensibilisés aux heuristiques afin qu'ils puissent les éviter ou du moins réduire les biais qui en résultent. La transparence du processus et la communication continue avec les experts sont cruciales pour réussir une élicitation d'opinions probabilistes. En effet, les méthodes utilisées pour solliciter les opinions, ainsi que l'ordre et la façon de poser les questions, peuvent avoir une influence sur les réponses des experts.

2.1.2 L'élicitation des probabilités

Il est bien établi que personne ne peut spécifier une probabilité avec une précision absolue à moins d'en connaître parfaitement tous les déterminants, ce qui est utopique (Daneshkhah *et coll.*, 2006). En plus, les experts doivent recourir à des heuristiques comportant la possibilité de biais importants. Il est donc critique d'éliciter les opinions des experts de façon à minimiser les biais heuristiques.

Cette étape comporte habituellement deux phases : premièrement, les estimations probabilistes des experts sont élicitées et, deuxièmement, on détermine une distribution statistique approchant bien les probabilités

estimées pour lisser les probabilités obtenues des experts. (Garthwaite *et coll.*, 2005, Adams, 2006).

La psychologie cognitive a beaucoup contribué à améliorer la méthodologie de l'élicitation de probabilités (Gilovich *et coll.*, 2002). Plusieurs experts préfèrent utiliser des représentations graphiques des probabilités et des incertitudes, comme des histogrammes, des tartes, des distributions cumulatives, etc. (Morgan et Henrion, 1990). La facilité à visualiser et à travailler avec ces graphiques sont les principaux avantages de cette technique. Cette simplicité diminue la précision, mais pour les besoins d'une élicitation d'opinion subjective, elle est généralement satisfaisante. Il est aussi possible de représenter l'opinion des experts en élicitant seulement des paramètres comme les quartiles ou la moyenne. Toutefois, la plupart des experts ne sont pas des experts en statistiques et pourraient ne pas être à l'aise d'exprimer leurs opinions de cette façon (Morgan et Henrion, 1990; O'Hagan *et coll.*, 2006).

La façon dont la question est posée aura aussi un impact sur la précision des estimations des experts. Généralement, une question type aura la forme suivante : « Quelle est la probabilité qu'une personne exposée au chrysotile souffre d'une maladie résultant d'une exposition à l'amiante chrysotile? » Cependant, une approche bayésienne favorise une question telle que : « Quel est votre niveau d'incertitude sur la quantité des personnes exposées qui souffriront d'une maladie reliée à l'amiante chrysotile? Ensuite, donnez un intervalle (a, b) qui contienne la vraie valeur avec une probabilité de 90%. ».

La deuxième étape consiste à trouver une distribution de probabilités qui s'approche le mieux des probabilités attribuées par les experts individuels. Cette étape dépend de la première puisque le type de probabilité élicitée influence la distribution utilisée. Par exemple, si les quantités incertaines sont additionnées (ex : si on veut estimer la proportion de la population qui souffrira de maladies reliées à l'amiante chrysotile selon les secteurs

industriels), on devrait utiliser la distribution normale. Pour des quantités incertaines se multipliant entre elles (ex : si on veut savoir quels facteurs influencent la probabilité d'avoir un cancer suite à une exposition à l'amiante chrysotile), on devrait employer une distribution logarithmique. Des événements variant de façon aléatoire en fonction du temps seront associés à des distributions exponentielles ou de Poisson (ex : lorsqu'on veut estimer la probabilité d'un accident dans une centrale nucléaire). Malgré ces principes, il n'y a pas de « vraie » distribution puisqu'on estime les paramètres d'un événement ou d'un état inconnu dont l'incertitude dépend de plusieurs facteurs autres que la variabilité du paramètre estimé (Morgan et Henrion, 1990). La distribution obtenue, en la comparant aux distributions standards, rendra possible l'interprétation et la modélisation des informations recueillies.

2.1.3 L'étape d'analyse

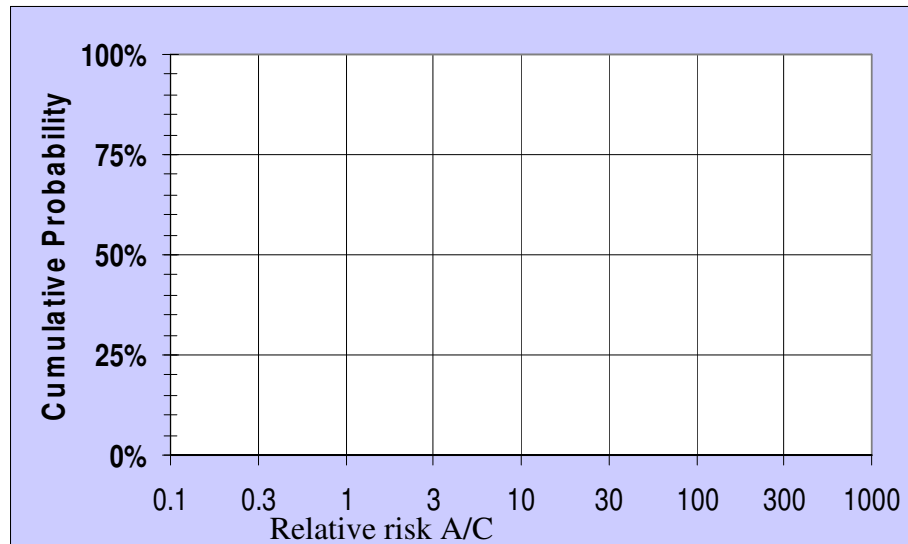
Lorsque les estimations probabilistes des experts ont été recueillies, deux options sont envisageables : interpréter les opinions recueillies ou recommencer le processus d'élicitation. Si, après avoir discuté avec les experts, ceux-ci confirment que les distributions probabilistes représentent bien leur opinion, l'interprétation des résultats peut alors débuter. Cette interprétation implique de trouver les informations qui se dégagent des jugements d'experts, non seulement sur les données de la littérature, mais aussi sur les incertitudes du domaine. Si ce n'est pas le cas, l'étape d'élicitation doit être recommencée pour s'assurer que les probabilités recueillies représentent bien les opinions des participants.

Lorsqu'on élicite les opinions d'un groupe d'experts (ce qui est habituel en évaluation de risques), il est important de ne pas forcer un consensus. En effet, le désaccord des experts nous donne de l'information sur l'état des connaissances dans le domaine. Un consensus dans un tel cas serait plutôt

un compromis ou une moyenne des opinions quantifiées qui ne refléterait pas les opinions individuelles et les divergences entre les experts (O'Hagan *et coll.*, 2006).

2.2 Méthodologie appliquée à un panel d'expertes sur l'amiante chrysotile

Faute de pouvoir demander également aux toxicologues et aux épidémiologistes d'estimer la relation exposition-effets dans les populations humaines, on a demandé aux expertes de caractériser la différence de toxicité relative entre l'amiante amphibole et l'amiante chrysotile : « Combien de fois plus cancérigènes sont les amphiboles relativement au chrysotile, séparément pour le cancer du poumon, le mésothéliome de la plèvre et le mésothéliome du péritoine? » Pour ce faire, les expertes ont exprimé leurs opinions sous forme de probabilités cumulatives que le ratio de toxicité amphibole/chrysotile soit inférieur à telle ou telle autre valeur, allant de 0,1 à 1000 fois. Le ratio de 1000 était explicitement décrit comme équivalant à n'attribuer pratiquement aucune toxicité au chrysotile. Les probabilités se représentaient automatiquement sur un graphique, au fur et à mesure que les expertes inscrivaient leurs probabilités subjectives. (Figure 5). C'était l'aspect probabiliste formel de l'élicitation.



Peritoneal Mesothelioma		
Ratio	Cumul.Prob.	Prob.Density
<i>0.1</i>	<i>0%</i>	<i>-</i>
<i>0.3</i>	<i>0%</i>	<i>-</i>
1	0%	-
<i>3</i>	<i>0%</i>	<i>-</i>
<i>10</i>	<i>0%</i>	<i>-</i>
<i>30</i>	<i>0%</i>	<i>-</i>
<i>100</i>	<i>0%</i>	<i>-</i>
<i>300</i>	<i>0%</i>	<i>-</i>
<i>1000</i>	<i>0%</i>	<i>-</i>

Figure 5 : Graphique et table de distribution de probabilités cumulatives subjectives utilisée pour éliciter les opinions des expertes du panel

Les expertes devaient remplir le tableau de risque relatif (« ratio » de toxicité) ci-dessus en associant des probabilités cumulatives à chaque intervalle. Par exemple, si le chiffre 5 avait été inscrit dans la première rangée, on dirait que l'expert croit qu'il y a 5% de chances que l'amiante chrysotile soit dix fois plus toxique que les amiantes amphiboles (un ratio

amphibole/chrysotile de 0,1). Ces probabilités étaient ensuite transposées automatiquement dans le graphique de distribution cumulative.

Enfin, plus fondamental à la démarche de consultation traditionnelle, les expertes ont remis un rapport de consensus, soulignant aussi les points de désaccord sur la toxicité du chrysotile, en révisant de façon critique deux grandes méta-analyses récentes de l'épidémiologie des maladies de l'amiante. Les expertes ont aussi remis des rapports individuels et deux ont rédigé des lettres nuanciant leur appui au consensus. Le rapport de consensus a permis de jauger les opinions et les probabilités individuelles en donnant un point de référence. Cela a guidé l'examen des heuristiques.

2.2.1 Analyse des opinions des expertes

En me basant sur les résultats de ce panel, j'ai analysé les opinions des expertes dans le but de trouver les biais et de les quantifier. Pour ce faire, j'ai développé une grille de lecture pour tenter de comparer les opinions des expertes aux données et aux incertitudes de la littérature (tableau II). Ceci m'a permis de voir dans quels domaines d'expertise les opinions des expertes divergeaient le plus de la littérature.

Plus spécifiquement, j'ai comparé les opinions des expertes aux données de la littérature par rapport à 6 facteurs, ainsi qu'à leurs effets sur la santé humaine, pouvant influencer soit la toxicité des amiantes directement ou soit les incertitudes du domaine. Ceux-là étaient : les propriétés physiques des fibres, la réactivité de surface, la biopersistance des fibres, les études in vitro, les études in vivo et les études épidémiologiques.

Tableau II : Chrysotile Vs amphiboles: données de la littérature et opinions d'expertes

Caractéristiques (incertitude)	Littérature	Experte A	Experte B	Experte C	Experte D	Experte E	Experte F
Dimensions des fibres							
Relation entre propriétés physiques et tox/cancérog.							
Réactivité de surface							
Relation entre réactivité de surface et cancer							
Biopersistance							
Relation entre biopersistance et cancer							
Études in vitro							
Extrapolation aux humains des études in vitro							
Études in vivo							
Extrapolation aux humains des études in vivo							
Études épidémiologiques							
Extrapolation à la population générale des études épidémiologiques							

Légende : Très confiante (TC), Confiante (C), Incertaine (I), Très Incertaine (TI) et Information Non-Disponible (ND)

2.2.2 Critères d'identification des heuristiques

Des critères d'identification ont été déterminés pour chacune des heuristiques décrites ci-haut. Basés sur les représentations quantitatives des opinions des expertes, ainsi que sur le rapport de consensus et les rapports individuels, ces critères pourront nous donner un aperçu des sources des biais qui affectent les jugements des expertes. En utilisant des grilles d'évaluation des experts et en me servant des informations provenant

de la littérature de la psychologie cognitive, j'ai essayé de rendre ce processus le plus formel et objectif possible (tableau III). Les critères sont :

1) Heuristique de l'*affect* : Cette heuristique est un processus subconscient par lequel les gens sont influencés dans leurs jugements, positivement ou négativement, selon leur état affectif (Slovic *et coll.*, 2002). Elle peut se présenter sous la forme d'une décharge massive ou d'un état général. On dira qu'un expert était trop influencé par cette heuristique s'il combinait plusieurs des caractéristiques suivantes :

a) il était en situation potentielle ou évidente de conflit d'intérêts (ex : revenus venant de contrats pour des membres ou représentants de l'industrie de l'amiante; revenus ou reconnaissance sociale venant d'intérêts ou de groupes anti-amiante, revenus de contrats pour l'industrie de produits de substitution à l'amiante),

b) il milite ou prêche publiquement ou dans des lobbys pour un point de vue politique particulier sur la question de la gestion du risque de l'amiante,

c) ses arguments allaient dans le sens de ses intérêts personnels,

d) ses arguments n'admettaient pas d'incertitudes ou de nuances justifiées par les données scientifiques,

e) il exprimait ses opinions ou points de vue avec une intensité émotionnelle disproportionnée ou de façon agressive,

f) il invoquait des arguments de gestion de risques pour justifier son estimation du risque.

2) Heuristique d'ancrage et d'ajustement : Tversky et Kahneman (1983) ont décrit l'heuristique d'ancrage et d'ajustement comme étant une stratégie

mentale qui survient lorsque les gens s'ancrent dans leur estimation initiale et ne s'ajustent pas assez avec l'arrivée de nouvelles informations. Si l'expert n'était pas en mesure de se dissocier de ses propres expériences ou, en d'autres mots, si l'expert revenait de façon récurrente aux conclusions de ses propres expériences sans accepter ou prendre en considération les arguments ou les données provenant d'autres domaines, on supposait qu'il était influencé par cette heuristique.

3) Heuristique de disponibilité : En psychologie cognitive, l'heuristique de disponibilité désigne un mode de raisonnement qui se base principalement sur les informations immédiatement disponibles dans la mémoire (O'Hagan *et coll.*, 2006). Si un expert appuie ses arguments sur des faits ou des études récentes ou proches de ses propres travaux presque exclusivement, en ne prenant pas en considération des données ou expériences importantes selon les autres experts, on émettait l'hypothèse que l'expert était influencé par l'heuristique de disponibilité.

4) Heuristique de représentation : La représentation est définie comme étant le rapport entre un échantillon et une population, ou similairement, entre un effet et un modèle (Tversky et Kahneman, 1983). Pour déceler cette heuristique, les généralisations faites par les experts ainsi que les incertitudes y étant associées ont été analysées. Par exemple, si un expert généralisait les conclusions tirées d'une étude limitée à un faible échantillon ou à des conditions de travail particulières à toute la population ou à toute exposition à l'amiante ou au chrysotile sans y attribuer une incertitude adéquate, ou, plus généralement, s'il généralisait avec une confiance exagérée une donnée particulière (ex : biopersistance de fibres) à un processus général ou lointain (ex : cancérogenèse), on supposait que l'heuristique de représentation biaisait les inférences de cet expert sur cette question.

Tableau III : Tableau d'identification des heuristiques pour chaque experte

Caractéristiques Discutées	Heuristiques			
	Affect	Ancrage et ajustement	Disponibilité	Représentation
Propriétés physiques des fibres				
Réactivité de surface				
Biopersistance				
Études in vitro				
Études in vivo				
Études épidémiologiques				

Légende : «++++» ou «----» : Très fortement biaisée (positivement si elle accorde trop d'importance aux caractéristiques et négativement si elle en accorde pas assez), «+++» ou «---» : Fortement biaisée, «++» ou «--» : Biaisée, «+» ou «-» : Faiblement biaisée, « 0 » : Neutre ou aucun biais perceptible, ND : Information non-disponible

2.3 Critique bayésienne de la consultation d'expertes sur le chrysotile par Santé Canada

En analyse de risques, la consultation d'experts requiert de nombreuses conditions d'intégrité et de validité. La présente critique ne vise pas toutes ces conditions, mais uniquement celles pertinentes à l'élicitation bayésienne d'opinions probabilistes. On examinera donc le processus et les résultats du comité d'expertes selon les critères suivants.

- Choix des expertes : Selon les critères de l'expertise, la pertinence, la complémentarité et la diversité d'opinions.
- Préparation de l'élicitation d'opinions et de probabilités :
 - Est-ce que les expertes ont pu se former aux probabilités?

- Les expertes ont-elles été mises en garde contre les biais possibles des heuristiques utilisées en évaluation de probabilités?
- Est-ce que les expertes ont pu se pratiquer pour calibrer leurs estimations probabilistes?
- Élicitation des probabilités :
 - La forme était-elle appropriée? Les instructions étaient-elles claires?
 - Est-ce que la diversité d'opinions était acceptée? Était-elle valorisée?
 - Est-ce que tout le monde a pu s'exprimer probabilistiquement?
- Biais et heuristiques :
 - Est-ce que des biais heuristiques ont nui à l'élicitation?
 - Ont-ils nui au consensus?
- Étape d'analyse :
 - La rétroaction (feedback) a-t-elle été utilisée?
 - Est-ce qu'une comparaison des opinions probabilistes individuelles avec celles du groupe a été effectuée?
- Atteinte des objectifs de la consultation :
- On examinera à quel point le comité d'expertes a réussi à remplir son mandat qui était d'estimer la relation dose-réponse (absolue ou relative aux amphiboles) avec expression du degré d'incertitude.

3 Résultats

Dans cette section, le féminin sera utilisé pour éviter d'écrire le masculin et le féminin, allégeant ainsi le texte et pour conserver la confidentialité des « expertes ». Cette section présente l'analyse de l'élicitation des opinions des expertes. Les opinions des expertes sont analysées individuellement pour déceler les heuristiques apparentes, le degré de convergence et le niveau de coopération des expertes dans le panel.

3.1 Fonctionnement et composition du panel

L'objectif principal du commanditaire du panel d'expertes était de caractériser quantitativement la relation dose-réponse de l'amiante chrysotile ainsi que son degré d'incertitude. Le commanditaire voulait aussi avoir un aperçu de l'hétérogénéité des opinions pour savoir si un consensus scientifique pouvait être établi.

Pour ce faire, ils ont demandé à six expertes provenant des domaines de la toxicologie (2), de l'épidémiologie (2), de la chimie (1) et de la géologie (1) de participer à un processus d'élicitation d'opinions d'experts sous forme d'un panel.

Le panel était présidé par une scientifique extérieure et indépendante, très respectée dans la communauté scientifique, neutre sur la controverse chrysotile-amphiboles, sans droit de vote dans le panel, et connaissant bien le domaine de la toxicologie des aérosols particuliers. À la réunion du panel, la présidente était responsable de coordonner le débat et de diriger les discussions pour atteindre les objectifs du panel. L'organisateur du panel, un épidémiologiste de Santé Canada, était présent mais n'a pas pris part aux discussions et est intervenu seulement pour clarifier les objectifs fixés pour la réunion ou pour accepter des changements proposés à ces objectifs.

Le plan de la consultation prévoyait de discuter avec les expertes, avant la réunion, de la nature et de la structure des fibres des amiantes pour ensuite éliciter leurs opinions et leurs incertitudes quantitativement et qualitativement avant, pendant et après le panel. Plus précisément, le but était de discuter avec les expertes des connaissances actuelles sur l'amiante chrysotile en utilisant une démarche « épistémologique » consistant à discuter des données *in vitro* en premier lieu, *in vivo* par la suite, et finir par les données épidémiologiques. Cette logique étagée avait pour principe de partir d'études et de données sur les propriétés physiques et chimiques des fibres, données plus objectives et plus certaines, en progressant vers des études expositions-effets plus incertaines et plus controversées.

En pratique, en raison des contraintes de temps imposées par le commanditaire, la sélection des membres du panel ne s'est effectuée que sur les 3 mois précédant la réunion, ne laissant pratiquement pas de temps à la préparation de la réunion comme telle avec les expertes. Toutes les étapes préparatoires sont donc tombées, sauf la proposition et l'échange d'articles scientifiques.

À cause de limites de temps donc, certains objectifs du panel ont été abandonnés et le panel a priorisé plutôt l'obtention d'un rapport de consensus relatif et qualitatif.

Les opinions probabilistes sur la toxicité relative des amphiboles et du chrysotile ont été obtenues juste au début de la réunion des expertes, et celles-ci ont pu discuter des résultats vers la fin de la réunion, avant de conclure sur leur consensus et leurs dissensions. Il n'y a donc pas eu de temps pour discuter des estimations de probabilités avant la réunion.

Dans les semaines précédant la réunion, les expertes ont échangé des articles et autres références devant servir d'arguments à leurs points de vue individuels.

3.2 Résultats du panel

Suivant les suggestions de Santé Canada, le panel s'est concentré sur deux méta-analyses épidémiologiques récentes et détaillées effectuées par Berman et Crump (2003) et par Hodgson et Darnton (2000). L'étude de Berman et Crump avait été subventionnée par le *U.S. Environmental Protection Agency* et l'autre, celle de Hodgson et Darnton, par le *British Health and Safety Executive*.

Les expertes du panel étaient d'accord pour affirmer que ces méta-analyses étaient globalement adéquates, très à jour et exhaustives. Leur méthodologie permettait d'estimer les risques de mésothéliome et de cancer du poumon dans l'état des connaissances actuelles. Les expertes ont cependant préféré le modèle linéaire de Berman et Crump au modèle curvilinéaire de Hodgson et Darnton. Ces derniers ont agrégé les données des études épidémiologiques pour comparer les relations expositions-risques moyennes entre les études, tandis que Berman et Crump ont analysé d'abord la relation expositions-risques pour des travailleurs à l'intérieur de chaque étude avant de résumer statistiquement (moyenne pondérée par la précision de chaque étude) ces relations. De plus, la méta-analyse tentait d'ajuster les relations expositions-risques dans chaque cohorte en fonction de la longueur des fibres dans chaque environnement et du pourcentage d'amphiboles pour contrôler ces deux variables.

Les expertes étaient aussi d'accord pour affirmer que la biopersistence des amphiboles est considérablement plus longue que celle du chrysotile dans le poumon et que cette caractéristique est un facteur déterminant de la toxicité des aérosols particuliers. De plus, comme la majorité des amphiboles ont plus d'ions de fer sur la surface de la molécule que le chrysotile, les amphiboles ont une plus grande réactivité de surface, un autre facteur influençant la toxicité des fibres d'amiante. Les expertes étaient d'accord sur les propriétés physiques des fibres : la toxicité des

fibres est fonction de la longueur et de la forme des fibres. Ainsi, les fibres plus longues et rigides sont les plus toxiques.

Les expertes étaient aussi d'accord avec les conclusions générales de la méta-analyse de Berman et Crump, mais elles n'ont pas voulu se prononcer sur les résultats quantitatifs de cette analyse, faute de temps pour approfondir la discussion et faute d'expertise commune (les expertes provenant de domaines différents ne pouvaient apprécier les résultats quantitatifs des méta-analyses sans discussions approfondies avec des épidémiologistes et un biostatisticien).

Certaines expertes, n'étant pas à l'aise avec quelques postulats de la méta-analyse et se méfiant des impacts de ces postulats sur les résultats, ont préféré se prononcer sur la toxicité relative des amphiboles et du chrysotile telle qu'élicitée de façon probabiliste dans le tableur Excel préparé par Santé Canada, tout en tenant compte des résultats de la méta-analyse de Berman et Crump. Deux expertes ont aussi exprimé des réserves sur le consensus du panel dans leurs rapports individuels.

3.3 Opinions des expertes

La grille d'évaluation des heuristiques comparait les croyances et les niveaux d'incertitude des expertes aux connaissances et niveaux d'incertitude faisant un consensus assez large dans la littérature (tableau IV). Ceci a permis d'identifier dans quels domaines les expertes semblaient trop confiantes, suggérant ainsi l'effet de biais heuristiques.

Tableau IV : Grille d'évaluation des heuristiques appliquées au panel d'expertes sur l'amiante chrysotile

Caractéristiques (incertitudes)	Littérature	Experte A	Experte B	Experte C	Experte D	Experte E	Experte F
Dimensions des fibres	La dimension des fibres affecte leur toxicité (TC)	Totalement d'accord (TC)	Totalement d'accord (TC)	Assez d'accord (C)	Assez d'accord (C)	Assez d'accord (C)	Totalement d'accord (TC)
Relation entre propriétés physiques et tox/cancérog.	Fibres longues et minces causent plus de cancers chez les humains (C)	Totalement d'accord (C)	Totalement d'accord (C)	Totalement d'accord (C)	D'accord, mais se montre plus incertaine (I)	D'accord, mais se montre plus incertaine (I)	Totalement d'accord (C)
Réactivité de surface	La réactivité de surface module la toxicité des fibres (TC)	ND	Totalement d'accord (TC)	ND	ND	ND	Assez en accord (C)
Relation entre réactivité de surface et cancer	Les amphiboles sont plus réactifs donc causent plus de cancers (C)	ND	Totalement d'accord (TC)	ND	ND	ND	Totalement d'accord (C)
Biopersistance	Plus les fibres sont biopersistantes plus elles sont toxiques (C)	Totalement d'accord (C)	Totalement d'accord (TC)	Totalement d'accord (C)	Peu d'accord: ne considère pas comme un facteur important de toxicité (I)	Peu d'accord: ne considère pas comme un facteur important de toxicité (I)	ND
Relation entre biopersistance et cancer	Les amphiboles sont plus biopersistantes donc causent plus de cancers (C)	Totalement d'accord (C)	Totalement d'accord (TC)	Totalement d'accord (C)	Peu d'accord: ne considère pas comme un facteur important de cancérogénéicité (I)	Peu d'accord: ne considère pas comme un facteur important de cancérogénéicité (I)	ND

Légende : Très confiante (TC), Confiante (C), Incertaine (I), Très Incertaine (TI) et Information Non-Disponible (ND)

Tableau IV (suite): Grille d'évaluation des heuristiques appliquées au panel d'expertes sur l'amiante chrysotile

Caractéristiques (incertitudes)	Littérature	Experte A	Experte B	Experte C	Experte D	Experte E	Experte F
Études in vitro	Les amphiboles sont plus toxiques pour les cellules en laboratoire (C)	Totalement d'accord et moins d'incertitude (TC)	Totalement d'accord (C)	Assez d'accord (I)	Assez d'accord (I)	Assez d'accord (I)	ND
Extrapolation aux humains des études in vitro	Les amphiboles sont plus toxiques chez les humains aussi (I)	Totalement d'accord (C)	Totalement d'accord (C)	Pas d'accord: pas les mêmes conditions en laboratoire (I)	Pas d'accord: pas les mêmes conditions en laboratoire (I)	Pas d'accord: pas les mêmes conditions en laboratoire (I)	ND
Études in vivo	Les amphiboles sont plus toxiques pour les animaux en laboratoire (TC)	Totalement d'accord (TC)	Totalement d'accord (TC)	Assez d'accord (C)	Pas d'accord: n'adhère pas aux conclusions de ces études (C)	Assez d'accord (C)	ND
Extrapolation aux humains des études in vivo	Les amphiboles sont plus toxiques chez les humains aussi (I)	Totalement d'accord (C)	Totalement d'accord (TC)	Peu d'accord: trop incertaine (I)	Pas d'accord: ne croit pas que les conditions de laboratoire sont représentatives (C)	Peu d'accord: trop incertaine pour effectuer cette extrapolation (I)	ND
Études épidémiologiques	Les amphiboles sont plus toxiques dans les populations étudiées (TI)	Assez d'accord (C)	Assez d'accord (C)	Peu d'accord: manque de preuves (I)	Pas d'accord: trop incertaine (C)	Peu d'accord: manque de preuves (I)	ND
Extrapolation à la population générale des études épidémiologiques	Les amphiboles sont plus toxiques pour la population générale (TI)	Totalement d'accord (C)	Assez d'accord (C)	Peu d'accord: trop d'incertitudes persistent (I)	Pas d'accord: croit qu'on ne peut pas tirer ces conclusions des études épidémiologiques (I)	Peu d'accord: trop d'incertitudes persistent (I)	ND

Légende : Très confiante (TC), Confiante (C), Incertaine (I), Très Incertaine (TI) et Information Non-Disponible (ND)

3.3.1 Opinions de l'experte A

Pour l'experte A, il était impossible que le chrysotile soit plus toxique que les amphiboles, et ce, pour chaque type de maladie en question (cancer du poumon, mésothéliome pleural et mésothéliome péritonéal) (figure 6). Elle estimait les amphiboles environ 10 fois plus toxiques que le chrysotile pour le cancer du poumon, avec un intervalle crédible à 90% entre 1,2 et 100 fois. Pour les deux types de mésothéliome, elle croyait que les amphiboles sont 30 à 1000 fois plus toxiques que le chrysotile. Elle quantifiait la toxicité relative des amphiboles et du chrysotile de façons différentes pour chacune des maladies, ce qui démontrait une nuance dans ses opinions.

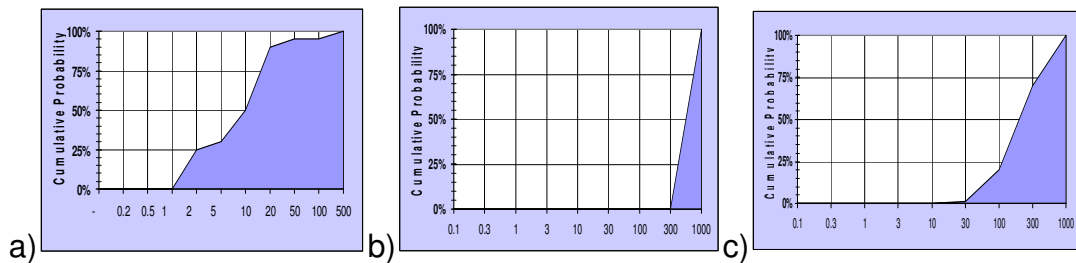


Figure 6 : Opinions quantifiées de l'experte A

Distribution cumulative représentant les opinions de l'experte A sur la toxicité relative des amphiboles et du chrysotile par rapport aux : a) cancer du poumon, b) mésothéliome péritonéal et c) mésothéliome pleural

L'experte A semblait peu biaisée par les heuristiques puisqu'elle semblait considérer tous les types d'études, toutes les études et tous les points de vue avec réflexion et estime, tout en relevant les points forts et les faiblesses (tableau V). Ses arguments tendaient toujours à minimiser la toxicité du chrysotile, et elle pouvait être influencée par l'heuristique de l'affect, lors des discussions, puisqu'elle travaillait pendant des décennies comme consultante privée pour des groupes « pro-chrysotile », bien qu'elle

conseillait parfois aussi des organismes de réglementation plus impartiaux. Cette experte s'ancrait aussi dans les études épidémiologiques auxquelles elle avait participé et qui démontraient une toxicité moindre du chrysotile. Par contre, elle ne semblait pas sujette au biais de représentation, considérant l'ensemble des études épidémiologiques et toxicologiques à peu près également. Sa grande connaissance de la littérature scientifique et ses références à des études de tous les domaines et de toutes les époques suggéraient aussi qu'elle ne recourait pas à l'heuristique de disponibilité.

Tableau V : Analyse des heuristiques affectant l'experte A

Caractéristiques Discutées	Heuristiques de l'experte A			
	Affect	Ancrage et ajustement	Disponibilité	Représentation
Dimensions des fibres	+	++	0	0
Réactivité de surface	ND	ND	0	ND
Biopersistance	+	++	0	0
Études in vitro	+	++	0	0
Études in vivo	+	++	0	0
Études épidémiologiques	-	--	0	+

Légende : «++++» ou «----» : Très fortement biaisée (positivement si elle accorde trop d'importance aux caractéristiques et négativement si elle en accorde pas assez), «+++» ou «---» : Fortement biaisée, «++» ou «--» : Biaisée, «+» ou «-» : Faiblement biaisée, « 0 » : Neutre ou aucun biais perceptible, ND : Information non-disponible

3.3.2 Opinions de l'experte B

Cette experte basait son opinion seulement sur les résultats des études *in vivo* et les propriétés physiques et chimiques des fibres. Les études de biopersistance avaient plus de poids pour cette experte que pour toute autre. Elle rejetait les arguments des études épidémiologiques en disant qu'elles contenaient trop d'incertitudes sur la caractérisation des expositions aux divers types d'amiantes et aux dimensions des fibres pour être valides.

Elle n'a donc pas tenu compte de ces études lors de la quantification probabiliste de ses opinions. L'experte B avait la certitude que le chrysotile ne pouvait aucunement causer de mésothéliomes, et n'acceptait aucun doute. En fait, les graphiques ne pouvaient rendre compte de sa conviction que le ratio de toxicité pour les mésothéliomes était plus grand que 1000 (puisque la valeur maximum du graphique est de 1000 et que les expertes devaient spécifier une médiane et un intervalle de confiance) (figure 7). Pour le cancer du poumon, l'experte B était persuadée que le ratio de toxicité devait être plus grand que 50. Pour les trois cancers, les opinions de l'experte B étaient radicalement différentes des opinions probabilistes des autres membres du panel.

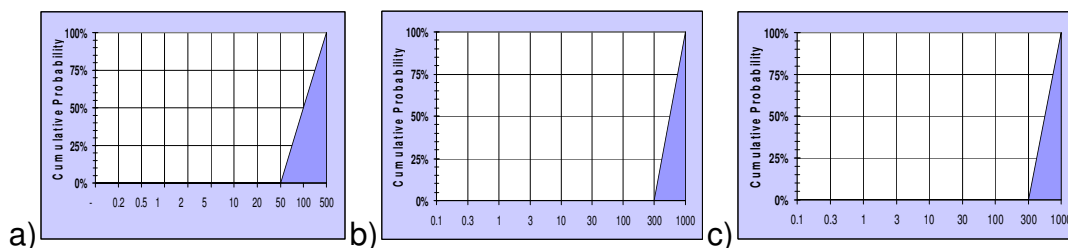


Figure 7 : Opinions quantifiées de l'experte B

Distribution cumulative représentant les opinions de l'experte B sur la toxicité relative des amphiboles et du chrysotile par rapport aux : a) cancer du poumon, b) mésothéliome péritonéal et c) mésothéliome pleural

On peut facilement supposer que cette experte était influencée par plusieurs heuristiques (tableau VI). Ses propos étaient souvent agressifs, ironiques ou sarcastiques, montrant un attachement émotionnel très fort à son point de vue et à ses expériences personnelles. L'heuristique de l'affect intervenait sans doute à force de défendre un point de vue radical (innocuité ou très faible toxicité du chrysotile) très controversé. De plus, elle était en conflit d'intérêts puisque ses travaux avaient été financés par l'industrie de

l'amiante. Cette scientifique de haut niveau défendait ses opinions avec des arguments scientifiques solides, mais minimisait ou attaquait systématiquement tout argument ou fait contraire.

L'heuristique d'ancrage et d'ajustement devait peser lourd dans ses opinions. Ses recherches sur la biopersistance des fibres et la réduction quasi exclusive de ses arguments au facteur de biopersistance étaient les seules invoquées lors de la quantification probabiliste de ses opinions. L'heuristique de disponibilité semblait aussi être présente puisque, dans ses propos, elle revenait constamment à sa plus récente étude pour argumenter avec les autres expertes. Son opinion était biaisée par l'heuristique de représentation, car elle ne doutait pas que la faible biopersistance des fibres de chrysotile chez l'animal impliquait nécessairement une très faible toxicité chez l'humain, même si d'autres caractéristiques des fibres sont réputées avoir un impact sur la toxicité.

Tableau VI : Analyse des heuristiques affectant l'experte B

Caractéristiques Discutées	Heuristiques de l'experte B			
	Affect	Ancrage et ajustement	Disponibilité	Représentation
Dimensions des fibres	++++	++++	+++	++++
Réactivité de surface	ND	ND	ND	ND
Biopersistance	++++	++++	++++	++++
Études in vitro	+++	+++	+++	+++
Études in vivo	+++	+++	+++	+++
Études épidémiologiques	----	----	---	----

Légende : «++++» ou «----» : Très fortement biaisée (positivement si elle accorde trop d'importance aux caractéristiques et négativement si elle en accorde pas assez), «+++» ou «---» : Fortement biaisée, «++» ou «--» : Biaisée, «+» ou «-» : Faiblement biaisée, « 0 » : Neutre ou aucun biais perceptible, ND : Information non-disponible

3.3.3 Opinions de l'experte C

L'experte C n'a presque jamais pris la parole durant toute la réunion malgré ses opinions connues et ses études importantes dans le passé. Deux hypothèses pourraient expliquer ce silence. La première et la plus probable, de l'avis d'autres expertes, est que l'experte C était mal préparée pour la réunion et n'avait pas lu les principaux documents de façon détaillée, ayant remplacé une experte qui s'était désistée à la dernière minute. La deuxième explication est que cette experte est plus détachée et donc moins impliquée dans la controverse que les autres. En effet, elle a fait des études démontrant une plus grande toxicité des amphiboles, mais aussi d'autres études soulevant le risque du chrysotile. Son faible niveau de participation reflétait alors peut-être une plus grande neutralité.

Elle a néanmoins participé à l'exercice de quantification d'opinions probabilistes (figure 8). Elle semblait accorder beaucoup d'importance aux arguments provenant du domaine de l'épidémiologie, mais elle a aussi incorporé dans son processus d'estimation des probabilités des ratios de toxicité, des arguments provenant des études animales ainsi que des études sur les propriétés chimiques et physiques des fibres d'amiantes.

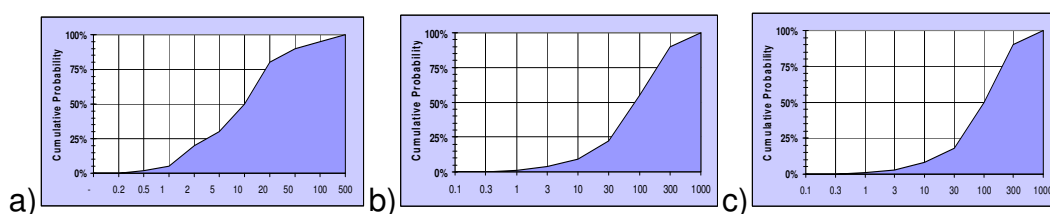


Figure 8 : Opinions quantifiées de l'experte C

Distribution cumulative représentant les opinions de l'experte C sur la toxicité relative des amphiboles et du chrysotile par rapport aux : a) cancer du poumon, b) mésothéliome péritonéal et c) mésothéliome pleural

Il est difficile d'analyser les heuristiques de cette experte étant donné sa faible participation aux discussions du panel. Par contre, on peut présumer qu'elle n'était pas biaisée par l'heuristique de l'affect puisqu'elle est restée neutre durant tout le panel (tableau VII). On sait aussi qu'elle n'avait pas de conflit d'intérêts.

Tableau VII : Analyse des heuristiques affectant l'experte C

Caractéristiques Discutées	Heuristiques de l'experte C			
	Affect	Ancrage et ajustement	Disponibilité	Représentation
Dimensions des fibres	0	ND	ND	ND
Réactivité de surface	0	ND	ND	ND
Biopersistance	0	ND	ND	ND
Études in vitro	0	ND	ND	ND
Études in vivo	0	ND	ND	ND
Études épidémiologiques	0	ND	ND	ND

Légende : «++++» ou «----» : Très fortement biaisée (positivement si elle accorde trop d'importance aux caractéristiques et négativement si elle en accorde pas assez), «+++» ou «---» : Fortement biaisée, «++» ou «--» : Biaisée, «+» ou «-» : Faiblement biaisée, «0» : Neutre ou aucun biais perceptible, ND : Information non-disponible

3.3.4 Opinions de l'experte D

Cette épidémiologiste mettait en doute les conclusions des méta-analyses des études épidémiologiques présentées lors du panel démontrant une différence de toxicité importante entre les amphiboles et le chrysotile. Ces méta-analyses avaient pourtant scruté minutieusement et statistiquement une vingtaine d'études chacune. En fait, l'experte D semblait douter de tout argument fondé sur d'autres études que la sienne, qui portait sur le cancer du poumon dans une cohorte de travailleurs donnée. De même, elle n'a voulu participer à l'exercice de quantification que pour le cancer du poumon, disant ne pas avoir assez de connaissances sur les mésothéliomes pour se

prononcer sur ce sujet (figure 9). Elle a donc estimé, avec peu d'incertitudes, que les amphiboles sont 1 à 5 fois plus toxiques que le chrysotile pour le cancer du poumon, avec une médiane près de 1,5 fois.

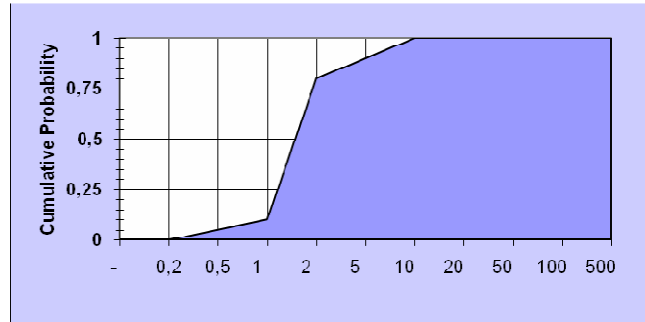


Figure 9 : Opinions quantifiées de l'experte D

Distribution cumulative représentant les opinions de l'experte D sur la toxicité relative des amphiboles et du chrysotile par rapport au cancer du poumon

Cette experte semblait donc biaisée par l'heuristique d'ancrage dans ses estimations probabilistes et ses propos lors du panel (tableau VIII). Elle ne relativisait pas assez sa propre étude et n'ajustait pas son opinion face aux arguments des autres expertes et aux autres études revues dans les méta-analyses. Cette heuristique était vraisemblablement liée à celle de disponibilité puisqu'elle ne critiquait pas ou n'invoquait pas de façon spécifique les études toxicologiques ou épidémiologiques autres que la sienne et une cohorte de mineurs.

L'heuristique de représentation pouvait aussi l'influencer puisque l'experte D ne doutait pas que son étude sur un groupe de travailleurs du textile était représentative des autres types d'exposition aux fibres de chrysotile, malgré des informations ultérieures sur la présence d'amphiboles dans les poumons des travailleurs et un effet apparent – bien que non significatif

statistiquement – des expositions des travailleurs à des huiles minérales vaporisées pour réduire l'empoussièrement.

Tableau VIII : Analyse des heuristiques affectant l'experte D

Caractéristiques Discutées	Heuristiques de l'experte D			
	Affect	Ancrage et ajustement	Disponibilité	Représentation
Dimensions des fibres	----	----	N/A	----
Réactivité de surface	----	----	N/A	----
Biopersistance	----	----	N/A	----
Études in vitro	----	----	N/A	----
Études in vivo	----	----	N/A	----
Études épidémiologiques	++++	++++	N/A	++++

Légende : «++++» ou «----» : Très fortement biaisée (positivement si elle accorde trop d'importance aux caractéristiques et négativement si elle en accorde pas assez), «+++» ou «---» : Fortement biaisée, «++» ou «--» : Biaisée, «+» ou «-» : Faiblement biaisée, « 0 » : Neutre ou aucun biais perceptible, ND : Information non-disponible

3.3.5 Opinions de l'experte E

L'experte E accordait beaucoup d'importance aux méta-analyses épidémiologiques présentées au panel. Or, ces études démontraient que les amphiboles étaient plus toxiques que le chrysotile, de façon évidente pour les mésothéliomes, mais de façon moindre et avec une incertitude assez élevée dans le cas du cancer du poumon. C'est ce qu'elle a reproduit lors de la quantification des opinions probabilistes (figure 10).

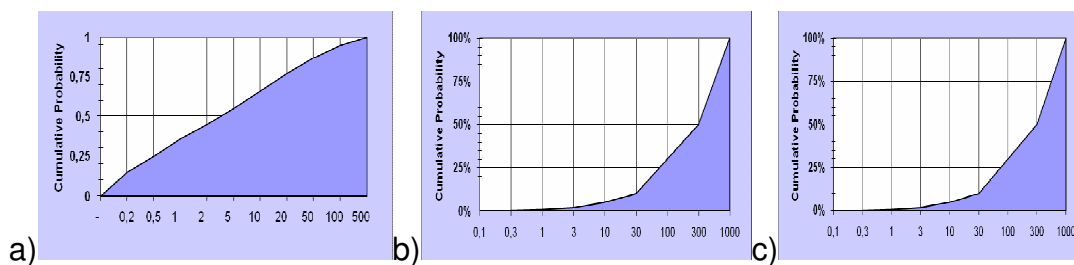


Figure 10 : Opinions quantifiées de l'experte E

Distribution cumulative représentant les opinions de l'experte E sur la toxicité relative des amphiboles et du chrysotile par rapport aux : a) cancer du poumon, b) mésothéliome péritonéal et c) mésothéliome pleural

Cette experte ne semblait pas fortement influencée par des heuristiques lors du panel. Elle n'était pas en conflit d'intérêt apparent et ne répondait pas aux autres critères de l'heuristique de l'affect. Cependant, on peut affirmer qu'elle utilisait tout de même, à un certain niveau, l'heuristique d'ancrage et d'ajustement puisqu'elle se basait en grande partie sur la méta-analyse épidémiologique dont elle était la co-auteure (tableau IX). Il est à noter que cette experte n'a pas réalisé d'études sur les amiantes, sauf en faisant une ou deux analyses statistiques pour d'autres chercheurs, qu'elle s'est d'emblée investie dans une méta-analyse exhaustive et qu'elle a participé à la modélisation de toutes sortes d'agents pathogènes. Ces caractéristiques la rendent plutôt « neutre » dans son approche de la question du chrysotile.

Tableau IX : Analyse des heuristiques affectant l'experte E

Caractéristiques Discutées	Heuristiques de l'experte E			
	Affect	Ancrage et ajustement	Disponibilité	Représentation
Dimensions des fibres	0	--	0	0
Réactivité de surface	ND	ND	ND	ND
Biopersistance	0	--	0	0
Études <i>in vitro</i>	0	--	0	0
Études <i>in vivo</i>	0	++	0	0
Études épidémiologiques	0	++	0	0

Légende : «++++» ou «----» : Très fortement biaisée (positivement si elle accorde trop d'importance aux caractéristiques et négativement si elle en accorde pas assez), «+++» ou «---» : Fortement biaisée, «++» ou «--» : Biaisée, «+» ou «-» : Faiblement biaisée, « 0 » : Neutre ou aucun biais perceptible, ND : Information non-disponible

3.3.6 Opinions de l'experte F

Similairement à l'experte C, cette experte n'a pas participé beaucoup aux discussions du panel malgré plus de deux décennies d'expertise dans le domaine. Elle a procédé à une présentation des résultats de ses analyses sur la toxicité des amiantes *in vitro* au début de la réunion, mais sur les données et les inférences épidémiologiques elle a été passive et silencieuse. Son rôle fut principalement de critiquer ou de tempérer les arguments de l'experte B. De plus, elle n'a pas voulu essayer de quantifier ses opinions à l'aide des graphiques fournis par les organisateurs parce que, de son propre aveu, elle ne comprenait rien aux probabilités cumulatives élicitées. En plus, elle ne semblait pas avoir lu les études épidémiologiques ni les méta-analyses proposées par les organisateurs.

D'après ses propos lors de la réunion et dans son rapport individuel, on peut tenter d'analyser les biais affectant ses jugements (tableau X). Son

retrait des discussions, combiné au fait qu'elle ne comprenait ni l'épidémiologie, ni les statistiques, ni les probabilités, a contribué à l'ancrage de ses opinions et de ses arguments dans son domaine d'expertise, et particulièrement dans les études minéralogiques et *in vitro*.

Tableau X : Analyse des heuristiques affectant l'experte F

Caractéristiques Discutées	Heuristiques de l'experte F			
	Affect	Ancrage et ajustement	Disponibilité	Représentation
Dimensions des fibres	+++	+++	ND	ND
Réactivité de surface	+++	+++	ND	ND
Biopersistance	+++	+++	ND	ND
Études <i>in vitro</i>	++++	++++	ND	ND
Études <i>in vivo</i>	---	--	ND	ND
Études épidémiologiques	---	ND	ND	ND

Légende : «++++» ou «----» : Très fortement biaisée (positivement si elle accorde trop d'importance aux caractéristiques et négativement si elle en accorde pas assez), «+++» ou «---» : Fortement biaisée, «++» ou «--» : Biaisée, «+» ou «-» : Faiblement biaisée, «0» : Neutre ou aucun biais perceptible, ND : Information non-disponible

3.3.7 Estimations probabilistes regroupées

Les moyennes des estimations probabilistes des expertes (5 expertes dans le cas du cancer du poumon et 4 expertes dans le cas des mésothéliomes) qui se sont prononcées ont été réalisées pour tenter de représenter l'opinion du groupe (figure 11).

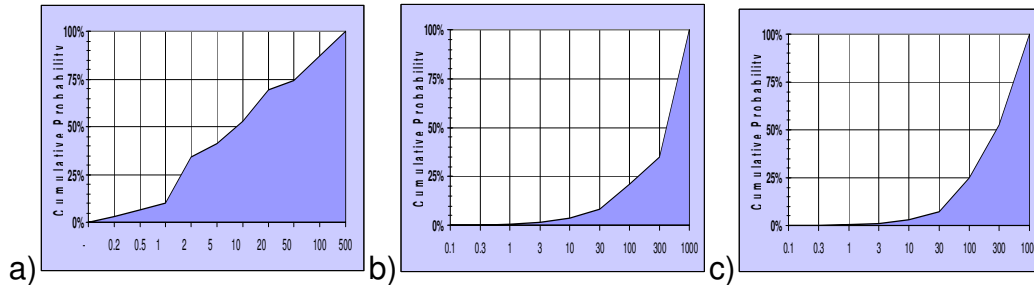


Figure 11 : Moyennes des opinions des expertes

Distribution cumulative représentant les moyennes des opinions des expertes sur la toxicité relative des amphiboles et du chrysotile par rapport aux : a) cancer du poumon, b) mésothéliome péritonéal et c) mésothéliome pleural

Toutefois, il faut être prudent lors de l'interprétation de telles données puisque ces moyennes ne refléteront l'opinion d'aucune experte si les opinions divergent trop. Par exemple, si deux expertes ont des opinions diamétralement opposées, la moyenne de leur estimation sera un point milieu qui ne représentera le point de vue ni de l'une ni de l'autre. C'est le cas ici pour le cancer du poumon puisque l'opinion des expertes B et D divergent grandement. Au contraire, s'il y a un consensus relatif entre les expertes, la moyenne des opinions représentera correctement l'opinion du groupe.

Quatre expertes ont exprimé des opinions probabilistes sur la capacité relative amphiboles/chrysotile d'induire des mésothéliomes. Elles croient que les amphiboles sont très probablement 15 fois ou plus cancérigènes que les fibres de chrysotile, et leurs meilleures estimations individuelles vont de 100 à plus de 1000 fois. La moyenne des estimations sur la toxicité relative se trouvait à environ 400 pour le mésothéliome péritonéal et à environ 275 pour le mésothéliome pleural. Toutefois, deux expertes ne se

sentaient pas aptes à exprimer des opinions probabilistes, en raison des limites de leurs expertises.

Cinq expertes ont exprimé des opinions probabilistes très hétérogènes sur la capacité relative amphiboles/chrysotile d'induire des cancers du poumon. Ainsi, leurs meilleures estimations individuelles de la toxicité relative étaient de 1, 3, 5, 10, et 100 fois respectivement. Leurs incertitudes ne se recoupaient que pour 3 de ces cinq expertes, tandis que l'une d'elles croyait que le ratio de toxicité était nécessairement plus grand que 50 fois et l'autre était tout aussi sûre que le ratio était certainement inférieur à 10 fois. Une distribution probabiliste moyenne ne serait donc pas valide car elle cacherait des opinions irréconciliables sur le plan probabiliste subjectif.

4 Discussion

Le panel international d'expertes réunies pour estimer la toxicité du chrysotile a produit des résultats relatifs (entre chrysotile et amphiboles) et qualitatifs, mais pas d'estimation quantitative de la toxicité et de son incertitude. Cet écart par rapport à l'objectif original du panel s'explique par le manque de temps de préparation de la réunion avec les membres du panel. Les expertes n'ont pas pu se familiariser suffisamment avec les méta-analyses épidémiologiques. Ces études devaient être utilisées par les expertes pour discuter des relations doses-réponses des amiantes. Les épidémiologistes du panel, étant les mieux placés pour interpréter les données de ces analyses, devaient discuter avec les expertes d'horizons différents du panel pour vérifier la présence et essayer d'expliquer les divergences et les incertitudes de ces études.

Les résultats incomplets du panel vis-à-vis son mandat, les tensions entre deux panélistes sur la toxicité du chrysotile, ainsi que les analyses des opinions individuelles et des heuristiques montrent que la réunion du panel ne s'est pas déroulée de façon optimale.

D'après le rapport de consensus du panel, les expertes se sont entendues sur la toxicité relative du chrysotile et des amphiboles pour les mésothéliomes. Les quatre (4) expertes qui se sont prononcées sur ce sujet croient que le chrysotile serait environ 300 fois moins dangereux pour les mésothéliomes que les amphiboles. Les 4 opinions probabilistes quantifiées démontrent des intervalles de confiance se superposant et donc concordants. Les deux autres expertes ne se sont pas prononcées quantitativement, mais étaient d'accord avec l'hypothèse supposant que le chrysotile ne cause aucun mésothéliome était statistiquement possible, ce qui semble corroborer partiellement les estimations qualitatives. Néanmoins, le silence d'un tiers des panélistes est équivoque et jette un doute sur la représentativité du consensus exprimé sur les mésothéliomes. C'est là une faiblesse du panel.

En fait, les deux « abstentions » venaient des deux membres du panel qui ne connaissaient pas bien l'épidémiologie des mésothéliomes et qui étaient aussi les plus critiques des études suggérant une moindre toxicité du chrysotile. Les données épidémiologiques étaient expliquées en détail dans les deux méta-analyses et ne montraient pas d'équivoque. Malgré leurs attitudes plus critiques, les deux expertes ont souscrit dans leurs rapports individuels rédigés après la réunion au consensus du panel sur les mésothéliomes. Je crois donc que le consensus sur le mésothéliome était réel, mais que le temps et une préparation interactive adéquate ont manqué pour aider à assimiler les données moins familières à certaines expertes et pour assimiler l'expression probabiliste de leurs incertitudes.

Dans le cas du cancer du poumon, des divergences d'opinions majeures se sont présentées, particulièrement entre l'experte E et l'experte B. La première accordait jusqu'à 30% la probabilité que les amphiboles soient moins toxiques que le chrysotile et elle était certaine que la différence ne peut pas être plus grande qu'un facteur 10. L'experte B, quant à elle, était convaincue que les fibres amphiboles sont au moins 50 fois plus toxiques que les fibres de chrysotile. Cette disparité représente bien l'hétérogénéité des études relevée par les méta-analyses et par le panel et l'impossibilité de conclure à une différence de toxicité pour le cancer du poumon.

Bien que le panel se soit entendu sur les caractéristiques physico-chimiques qui déterminent la toxicité relative de l'amiante chrysotile par rapport à la toxicité des amphiboles, le panel n'a pas discuté de l'importance de ces déterminants dans la toxicité relative chrysotile / amphiboles. Dans une perspective bayésienne, le panel aurait pu estimer ou au moins discuter des différences de cancérogénicité du poumon et des mésothéliomes auxquelles on pouvait s'attendre *a priori*, avant même d'examiner les méta-analyses des études épidémiologiques.

4.1 Choix des expertes

Plusieurs méthodes, formelles et informelles, existent pour sélectionner des experts lors d'un processus d'élicitation, mais les objectifs de cette étape restent toujours les mêmes, soit : identifier les domaines d'expertises appropriés, représenter adéquatement les différentes écoles de pensées et ce, de façon à ce que le protocole soit reproductible, raisonnable et juste (Hawkins et Graham, 1988).

Santé Canada a décidé d'inviter des scientifiques de renommée internationale provenant de domaines d'études différents et complémentaires. Cependant, certaines d'entre elles avaient des conflits personnels émanant de débats antérieurs et semblaient avoir une opinion ou un affect négatif face à quelques expertes dès le début de la réunion. Il aurait été difficile, voire impossible pour Santé Canada d'éviter ce problème tout en conservant une diversité d'opinions, étant donné la longue histoire et la grande complexité que pose la problématique des amiantes. Toutefois, ces conflits auraient pu être diminués en invitant des expertes plus neutres et n'ayant pas de conflits antérieurs. C'est ce que Santé Canada voulait faire, mais leur choix d'expertes a été limité par la disponibilité de celles-ci et par le fait que quelques expertes se sont retirées du panel peu de temps avant son commencement.

4.2 Préparation de l'élicitation d'opinions et de probabilités

La plus grande lacune au niveau de l'organisation du panel fut dans la préparation des expertes à l'exercice d'élicitation de probabilités (étapes 1.2, 2.1 et 2.2 de la figure 4). Le manque de temps et les pressions des

cadres supérieurs pour accélérer le processus étaient les principales raisons invoquées pour expliquer cette lacune. En effet, suite au retrait du panel de quelques expertes peu de temps avant le début de celui-ci, Santé Canada aurait dû retarder la réunion. Toutefois, ceci aurait engendré des coûts supplémentaires que le gouvernement n'était pas prêt à assumer.

Ceci a fait en sorte que les expertes n'étaient pas assez versées en probabilités pour entreprendre un processus d'élicitation quantitative de manière rigoureuse. L'experte F a même refusé de participer à l'exercice de quantification des opinions puisqu'elle n'était pas à l'aise avec le principe de la distribution cumulative. Même certaines expertes provenant du domaine de l'épidémiologie, un domaine reconnu pour ses applications fréquentes de théories statistiques, ont demandé plusieurs clarifications et explications au sujet des distributions cumulatives, des extrémités de ces distributions et de leur interprétation. Ceci a évidemment pu introduire des biais lors de la quantification de leur opinion.

Il aurait été important pour les organisateurs du panel de discuter avec les expertes pour trouver une formule ou une méthodologie d'élicitation qui leur convienne. En rendant le processus plus transparent, ces expertes auraient su à quoi s'attendre et auraient pu refuser de participer dès le début de l'organisation du panel, laissant ainsi leur place à d'autres expertes ayant décidé de participer de façon éclairée. Par exemple, Walker *et coll.* (2001), pour caractériser une exposition au benzène, ont interviewé en personne sept expertes individuellement avant la réunion du panel et ce, en utilisant toujours le même protocole d'interview. Ce dernier consistait premièrement à leur faire part des objectifs généraux de la réunion. Ensuite, ils leur ont expliqué le déroulement de la réunion et finalement, ils les ont mis en garde contre les difficultés et les biais heuristiques pouvant affecter leur opinion lors du processus d'élicitation.

4.3 L'impact des biais et des heuristiques

Les biais et les heuristiques ont affecté les expertes du panel de plusieurs façons. En effet, le but premier de cette réunion était d'avoir un débat scientifique, afin de peser les pour et les contre de chaque argument favorable ou non à l'utilisation de l'amiante chrysotile. Idéalement, des consensus quantitatifs et qualitatifs auraient été établis et Santé Canada aurait pu prendre une décision éclairée suite à ce débat. Toutefois, en partie à cause des lacunes au niveau de l'organisation et en partie à cause de la forte controverse entourant le sujet, les buts n'ont pas tous été atteints.

Le consensus qualitatif obtenu suite à la réunion représente bien les opinions des expertes individuellement, mais ce panel ne semble pas avoir produit un résultat différent que si l'on avait consulté les expertes individuellement. Par contre, si les expertes avaient été moins influencées par les biais des heuristiques, les discussions auraient pu être plus nuancées et plus convergentes – ce n'est pas sûr, mais c'est possible. Le rapport de consensus aurait potentiellement contenu une valeur informative plus grande que la somme de ses parties et aurait ainsi été plus utile pour les preneurs de décisions.

Plusieurs expertes lors du panel étaient manifestement influencées par l'heuristique de l'affect. Ceci biaisait non seulement leurs opinions et leurs probabilités sur la toxicité du chrysotile et des amphiboles, mais cela rendait aussi les échanges d'arguments provenant de différents domaines très difficiles ou sans effet. Certains conflits d'intérêts ont pu exacerber la situation et ont diminué, jusqu'à un certain point, le poids des arguments et des études de certaines expertes.

L'heuristique d'ancrage et d'ajustement a peut-être eu le plus d'impact sur les discussions. Les expertes ne débattaient que des sujets et des données

qu'elles connaissaient et avec lesquels elles étaient à l'aise, en commençant par leurs propres études. Ainsi, l'experte F a refusé de collaborer à la quantification de ses opinions, car elle ne connaissait pas assez bien les statistiques et les distributions cumulatives. L'experte D ne s'est prononcée que sur le cancer du poumon, puisqu'elle a seulement fait des études sur cette maladie.

Quelques expertes étaient aussi influencées par l'heuristique de disponibilité. Toutefois, cette heuristique était plus difficile à déceler. Par exemple, lorsque les expertes accordaient plus de poids aux arguments provenant d'études plus récentes ou dans leur domaine, je ne pouvais affirmer qu'elles étaient biaisées puisque les études plus récentes sont probablement plus valables, si l'on tient compte de l'avancement des méthodes de laboratoire et de détection des fibres et parce que ce biais pouvait se confondre avec un biais d'ancrage. L'identification de ce biais était difficile et nécessiterait des critères plus précis.

L'heuristique de représentation a aussi été décelée chez quelques expertes. Similairement à l'analyse de l'heuristique de disponibilité, l'analyse de cette heuristique était plus ambiguë et laissait place à une interprétation plus subjective. Les expertes A, B et D ont démontré des signes de cette heuristique puisqu'elles extrapolaient des conclusions d'études effectuées *in vitro*, *in vivo* ou encore chez une cohorte de mineurs à la population générale et ce, en n'accordant pas assez (comparativement à la littérature et aux autres expertes) d'incertitudes à leurs suppositions. Toutefois, il est difficile de juger les incertitudes adéquates à accorder à ces généralisations puisque ce sont les seules études sur lesquelles elles pouvaient baser leurs opinions et leurs estimations. Encore une fois, ceci indique un besoin pour des critères standards plus précis et plus objectifs.

Certains biais sont évidemment inévitables dans un processus d'élicitation, mais beaucoup de biais auraient pu être réduits avec un entraînement plus adéquat des expertes. Celles-ci ne connaissaient pas les conséquences de l'utilisation des heuristiques, ni même la définition d'une heuristique et n'avaient probablement jamais essayé l'exercice de quantifier leurs opinions.

Pour éviter ces difficultés, Walker *et coll.* (2001) ont travaillé avec des expertes pour développer leurs connaissances en statistique. À chaque fois qu'une experte estimait la moyenne et les 90^{ième} centiles d'une distribution concernant une exposition au benzène, elle devait : 1) discuter et critiquer les informations qu'elle allait utiliser pour faire son estimation, 2) caractériser l'incertitude et la variabilité de l'exposition chez la population cible, 3) identifier et discuter des sources d'incertitudes provenant de la généralisation des études existantes au problème en question, 4) quantifier son opinion sur la « vraie » valeur de l'exposition, 5) identifier des sources potentielles de biais et d'erreurs stochastiques et 6) ajuster son estimation en fonction de ces biais et ces erreurs. En comparant ces estimations aux données du *National Human Exposure Assessment Survey* (NHEXAS) pour la même population, les auteurs rapportent que certaines heuristiques étaient tout de même présentes, surtout celle de disponibilité, mais que les expertes avaient estimé avec plus de précision les niveaux d'expositions au benzène de cette population comparativement à une estimation basée simplement sur des études existantes provenant d'autres régions (Walker *et coll.* 2003).

Finalement, pour ce qui est de l'atteinte des objectifs de Santé Canada, ils ont réussi à obtenir des informations des expertes individuellement sur la toxicité relative des amphiboles et du chrysotile, mais l'utilité des informations provenant du groupe d'expertes est discutable. En effet, les opinions des expertes n'ont pas ou presque pas évolué durant et après le

panel. La réunion des expertes et le rapport de consensus sont venus simplement confirmer ce que Santé Canada savait déjà : la problématique des amiantes est un sujet controversé.

4.4 L'approche bayésienne

Les distributions de probabilités subjectives individuelles exprimées par les expertes du panel ont permis de mieux saisir le degré réel de divergences et de consensus entre les membres du panel. En fait, elles ont favorisé la conclusion du consensus du panel (qui corroborait celle de la méta-analyse de Berman et Crump) en mesurant la similarité des distributions de probabilités subjectives pour le mésothéliome et l'hétérogénéité pour le cancer du poumon.

Par contre, dans l'approche conventionnelle du panel, plusieurs études épidémiologiques incomplètes ou hors du milieu du travail n'ont pas été examinées ni prises en compte par les expertes : 1) les études de populations exposées indirectement ou à de faibles concentrations d'amiantes (résidants de villes minières d'amiante, familles de travailleurs de l'amiante), 2) les études de travailleurs exposés à divers types d'amiantes mais sans mesures valables des expositions, 3) les études cas-témoins avec des mesures de charges pulmonaires sans mesures d'expositions ambiantes. En outre, le panel n'a pas utilisé explicitement et probabilistiquement les données physico-chimiques, minéralogiques et toxicologiques pour pondérer et calibrer les résultats hétérogènes ou paradoxaux des études épidémiologiques (ex : quelles données épidémiologiques semblaient plus cohérentes avec ce que l'on sait de la toxicité des fibres?).

Similairement, les études sur l'amiantose ont été complètement laissées de côté par le panel, par les méta-analyses utilisées et par les analyses précédentes des risques des amiantes. Ceci appauvrit l'analyse des risques de cancers, en particulier pour le cancer du poumon, parce que les amiantoses indiquent des expositions élevées et partagent vraisemblablement des mécanismes toxicologiques avec des cancers du poumon induits par les fibres d'amiante (Meldrum, 1995)

Contrairement à l'approche conventionnelle, l'approche bayésienne aurait pu être employée pour tenter de formaliser l'intégration de ces données et études, par l'estimation subjective a) des expositions de diverses populations étudiées, b) de la relation entre charges pulmonaires et expositions cumulatives, c) de la relation entre risques d'amiantose et risques de cancers du poumon, etc. Cela impliquerait aussi des erreurs, inévitablement, mais celles-ci pourraient s'inscrire sur le continuum d'approximations s'appliquant déjà aux études en milieu de travail intégrées dans les méta-analyses. Ainsi, plusieurs études épidémiologiques sur des travailleurs de l'amiante ont converti des mesures de poussières respirables totales en concentrations de fibres d'amiantes malgré des correspondances très imparfaites (corrélations linéaires (ρ) de 0.5 ou moins), et n'avaient pratiquement pas de données sur le tabagisme des travailleurs, rendant les comparaisons entre sous-groupes de travailleurs imprécises (Dagbert, 1976).

Les études de Camus *et coll.* (2002, 1998) et Hansen *et coll.* (1998) sur les populations avoisinant des mines de chrysotile et de crocidolite ont montré la quantification possible des expositions et un gradient d'expositions et de risques très marqué entre ces populations et les populations plus lointaines. Les études de Camus et de Hansen ont aussi montré une grande similarité entre les relations exposition-effets observées chez les travailleurs et les résidents d'une même région, ainsi qu'une forte différence de toxicité entre le chrysotile et la crocidolite. D'autres études environnementales n'ont pas

quantifié les expositions, mais une extrapolation subjective par des experts utilisant les résultats de Camus et de Hansen serait possible. La combinaison des études environnementales et occupationnelles semblerait donc de mise et possible avec une approche bayésienne. Il en va de même pour les autres types d'études négligés par une approche strictement statistique et épidémiologique fréquentiste.

Un autre aspect important de la méthodologie bayésienne est qu'elle permet d'incorporer des données subjectives et leur incertitude sous formes de probabilités et d'intervalles de confiance dans un modèle d'analyse de risques (Morgan et Henrion, 1990). Dans le cas de l'amiante chrysotile, les études toxicologiques pourraient être utilisées comme distributions probabilistes de valeurs attendues *a priori*. Par ailleurs, les études épidémiologiques environnementales et les études en milieu de travail avec des expositions non quantifiées auraient pu être utilisées pour corroborer les études intégrées dans les méta-analyses avec des distributions expositions-effets subjectives larges, dont l'étendue des incertitudes (variance des estimations) atténuant leur poids dans la méta-analyse.

En réalité, l'approche fréquentiste incorpore aussi des données subjectives dans leurs modèles, par exemple dans la détermination de la valeur critique de signification, mais elle ne les quantifie pas et ne reconnaît pas les incertitudes y étant associées, ce qui rend l'interprétation de telles études plus difficiles (O'Hagan *et coll.*, 2006). Par exemple, dans la méta-analyse de Berman et Crump, les auteurs utilisent des facteurs d'incertitude *a posteriori* pour déterminer l'impact de la longueur des fibres ainsi que les erreurs de mesures des expositions sur les résultats des études épidémiologiques, mais ils n'essayent pas de reconnaître les incertitudes ou d'attribuer un intervalle de confiance à ces valeurs. En fait, ils ne nous donnent pas de détails sur la méthodologie qu'ils ont utilisée pour trouver ces facteurs.

Comme il a été fait mention plus haut, la complexité croissante des problèmes aujourd'hui nécessite plus souvent que des opinions d'experts soient recueillies et ce, dans différents domaines. Les probabilités et les statistiques utilisées dans l'approche bayésienne peuvent aider à relier les différentes spécialisations scientifiques en leur donnant une base ou un langage commun. Dans le cas du panel sur le chrysotile, une toxicologue expérimentaliste a ainsi pu quantifier probabilistiquement la différence de toxicité relative entre le chrysotile et les amphiboles de la même façon que des statisticiens et des épidémiologistes, même si leurs données et leurs observations sont de nature très différente.

L'application de l'approche bayésienne comporte cependant des inconvénients. En principe, elle permettrait de modéliser et d'analyser les risques d'une façon plus complète que l'approche fréquentiste classique et serait plus utile dans plusieurs situations. Toutefois, l'incorporation de données subjectives n'est pas facile en pratique et laisse place, par définition, à beaucoup d'interprétations et de critiques divergentes. Par exemple, dès les premières étapes du processus, le choix des experts pourrait être fait en fonction des points de vue connus des experts qui seraient choisis pour appuyer l'opinion des organisateurs du panel. Ces biais peuvent toutefois affecter aussi bien l'analyse de risques classique que l'analyse de risques bayésienne. En fait, la formalisation bayésienne aurait l'avantage de montrer explicitement combien de poids ont les *a priori* et les approximations subjectifs relativement aux observations empiriques quantitatives. Dans les méta-analyses, comme celles qui sont utilisées pour les estimations de risques liées aux amiantes, les jugements de valeur sur le poids des études ou les ajustements apportés par les « méta-analystes » aux études et données rapportées dans la littérature scientifique sont noyées dans les estimations quantitatives finales et ont un poids indéfini.

4.4.1 Difficultés d'application au panel sur l'amiante chrysotile

Lors de l'analyse du panel d'expertes sur l'amiante chrysotile, j'ai été confronté à certaines difficultés du point de vue de l'application de la méthodologie bayésienne.

Comme je ne faisais pas partie du comité d'organisation du panel, j'ai reçu les informations concernant la méthodologie d'élicitation seulement peu de temps avant la réunion. De plus, je n'ai pas eu la chance de discuter avec les expertes personnellement. Je devais baser mes analyses et mes propos sur des documents provenant de la réunion (les rapports de consensus et les rapports individuels ne sont pas encore publiés au moment de la rédaction). Je n'ai donc pu appliquer la méthodologie que de façon critique et incomplète. Pour que l'approche soit mise en oeuvre rigoureusement, elle doit être appliquée dès le début de l'organisation et non seulement lors des étapes d'élicitation et d'analyse (O'Hagan *et coll.*, 2006; Walker *et coll.*, 2003).

Pour ces raisons, la tâche d'analyse des heuristiques a été plus complexe. Effectivement, une grille d'évaluation des heuristiques comme celle qui est présentée dans la section résultats aurait dû être remplie par les expertes elles-mêmes avant la réunion (tableau 5). En effet, ceci aurait été plus représentatif de leurs opinions, puisque j'ai dû interpréter leurs propos lors du panel, dans le rapport de consensus et dans les rapports individuels seulement.

Néanmoins, je crois que l'analyse des expertes individuellement par rapport aux heuristiques spécifiques serait demeurée une étape difficile et subjective, quoique très informative (tableau 6-11). Comme les heuristiques sont des mécanismes mentaux souvent utilisés inconsciemment, il n'est pas toujours facile de déceler la stratégie mentale utilisée par un expert pouvant potentiellement biaiser ses opinions. Particulièrement, la distinction entre l'heuristique d'ancrage et d'ajustement et de disponibilité était plutôt

obscur pour certaines expertes. Par exemple, l'experte B basait ses opinions sur ses propres études qui étaient aussi des études récentes. Dans ce cas, est-ce que l'experte utilisait les deux heuristiques ou seulement une? Est-ce qu'il y a une différence entre les biais résultants dans les deux cas? Si oui, est-ce que les biais interagissent de manière additive ou supra-additive, c'est-à-dire est-ce que les effets s'additionnent ou est-ce qu'ils interagissent de façon synergique causant ainsi des biais plus importants que prévus par simple addition?

Les mêmes questions peuvent se poser avec l'heuristique de l'affect et les trois autres heuristiques. Il est ambigu de faire la différence entre un expert qui ne veut pas accepter les arguments d'un autre expert à cause d'une raison personnelle ou en raison du trop grand poids qu'il accorde à ses propres études. Selon ces résultats, je propose deux façons dont les heuristiques pourraient interagir. La première et la plus simple implique une interaction équivalente entre toutes les heuristiques (Figure 12a). Toutefois, dans une analyse de risques comme celle des amiantes, on peut supposer une hiérarchie dans l'importance des influences des heuristiques (Figure 12b). En effet, lors du panel, l'heuristique de l'affect semblait être la plus importante et la plus influente sur les opinions des expertes. On peut supposer que cette heuristique influençait l'utilisation des autres types d'heuristiques par les expertes

En retour, l'ancrage et l'ajustement pourraient aussi renforcer l'heuristique de l'affect avec le temps et, inévitablement, pourrait augmenter l'utilisation de l'heuristique de disponibilité et de représentation. En effet, plus un expert est ancré dans ses études, plus il les défendra avec conviction et émotions. Ses études seront aussi très disponibles dans sa mémoire puisqu'il en parle souvent et il n'aura d'autre choix que de généraliser les conclusions de ses études pour qu'elles soient valables dans différentes circonstances.

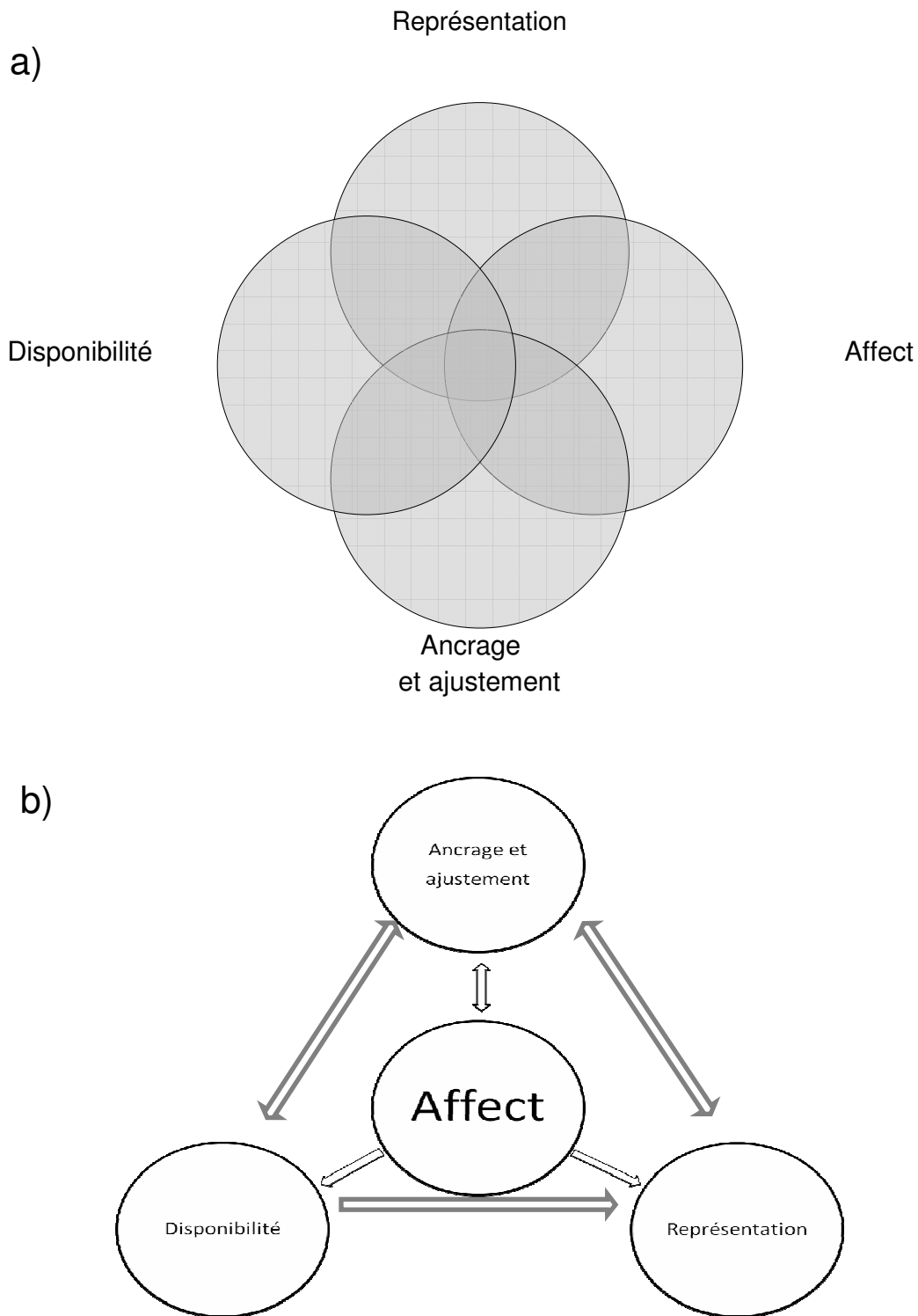


Figure 12: Diagrammes d'interaction des heuristiques

Figure a) modèle équivalent où toutes les heuristiques interagissent et ont la même influence. Figure b) : modèle hiérarchique où l'heuristique de l'affect domine.

De plus, le tableau comparant les opinions et les incertitudes des expertes aux données de la littérature comporte une lacune importante : il ne laisse pas place à la marginalité. C'est-à-dire que l'experte pourrait avoir raison en se dissociant des données de la littérature, mais dans un tel cas, elle serait perçue comme étant biaisée. Ce n'est donc peut-être pas la meilleure façon d'analyser les opinions dans des circonstances où il y a peu de données dans la littérature, comme dans le cas d'une analyse de risques d'une nouvelle substance. Toutefois, dans le cas de l'amiante chrysotile, une problématique qui perdure depuis plusieurs années, il était raisonnable de supposer qu'il y avait suffisamment de données dans la littérature pour conclure qu'une experte était biaisée si son opinion divergeait ou si celle-ci n'incluait pas assez d'incertitudes comparativement à ces données.

Aussi, il reste encore des questions concernant l'interprétation des analyses heuristiques des expertes. En effet, outre le fait que ces résultats nous démontrent le besoin de calibrer les expertes dans leurs estimations de probabilités avant d'entamer un processus d'élicitation, nous pouvons nous demander quelle utilité ces analyses auraient si les expertes restaient toujours biaisées après les séances de pratique. Il serait possible d'accorder un poids différent à chaque experte basé sur leur niveau de biais, mais ceci engendrerait l'incorporation de subjectivité additionnelle dans l'analyse de risques (O'Hagan *et coll.*, 2006). Alors, la prochaine question est : Quand doit-on arrêter d'incorporer et de quantifier les incertitudes dans nos modèles? Par exemple, doit-on attribuer une incertitude à la subjectivité introduite par le choix des expertes? Par le poids attribué à chaque opinion? Par l'analyse des heuristiques?

Ce débat quasi philosophique soulève un autre inconvénient de cette approche : elle nécessite beaucoup de temps. En effet, elle rajoute des étapes dans le processus d'analyse de risques qui n'étaient pas présentes

dans l'approche traditionnelle. La quantification et l'interprétation des incertitudes et des biais en sont des exemples. De plus, pour bien connaître les opinions, ainsi que toutes les nuances pouvant y être associées, les experts doivent débattre plus longuement leur point de vue en apportant plusieurs arguments pour le supporter. Dans le cas du panel sur l'amiante chrysotile, les panélistes n'ont pas eu suffisamment de temps en deux jours pour discuter de tous les facteurs pouvant influencer la décision de Santé Canada et encore moins de temps pour argumenter et soutenir leurs opinions. Cette nécessité de temps additionnel engendre évidemment des coûts supplémentaires qui ne peuvent pas toujours être assumés afin d'effectuer une analyse de risques.

5 Conclusion

L'approche bayésienne utilisée en analyses de risques environnementaux complète l'approche fréquentiste en permettant l'incorporation de données subjectives et la quantification des incertitudes. En particulier, les experts peuvent prendre en considération d'autres données que celles quantifiées statistiquement. Quoiqu'imparfaite, cette approche s'applique plus facilement que l'approche traditionnelle à des situations où les données quantitatives sont rares, faibles, hétérogènes ou controversées : des situations où les incertitudes épistémiques dépassent les incertitudes statistiques. Dans le cas de l'amiante chrysotile, avec une problématique controversée depuis plusieurs années, l'approche bayésienne et l'élicitation d'opinions d'experts semblent indiquées. Les expertes ont préféré quantifier de façon probabiliste leurs opinions sur la toxicité relative des amphiboles et du chrysotile plutôt que de porter un jugement sur les relations expositions-effets quantitatives estimées par des méta-analyses effectuées par l'U.S. EPA et par le U.K. HSE. Grâce à cette quantification probabiliste des opinions et des incertitudes leur étant associées, un consensus relatif et son degré d'incertitude ont pu être établis pour les effets du chrysotile sur les mésothéliomes. De même, l'absence de consensus et le degré de divergences entre les expertes ont pu être établis pour le cancer du poumon. L'élicitation probabiliste effectuée, bien que très imparfaite, a permis d'obtenir des opinions des expertes plus nuancées que si elles avaient été élicitées sans quantification des incertitudes panélistes, et c'est ce qui a permis de trouver des terrains sur lesquels les expertes s'accordaient.

Cependant, l'approche bayésienne ne fut pas appliquée lors de ce panel. On remarque que même les expertes de renommée internationale étaient influencées par plusieurs heuristiques qui biaisaient leurs opinions. En particulier, la plupart des membres du panel accordaient beaucoup d'importance à leurs propres études et beaucoup moins aux études des autres, et ils n'ont pas intégré suffisamment les données toxicologiques

avec les données épidémiologiques, même si en principe un expert doit intégrer toutes les données de la littérature lorsqu'il publie un article. Une méthodologie plus rigoureuse ainsi qu'un calibrage des expertes auraient pu diminuer ces biais, mais n'auraient jamais pu les éliminer complètement, puisqu'ils sont une partie inhérente du processus d'élicitation d'opinions.

L'analyse ainsi que la quantification des biais résultant de ces heuristiques n'étaient pas intuitives et laissaient place à beaucoup d'interprétation et de subjectivité. Je crois que l'important est de reconnaître que ces heuristiques existent et influencent les jugements de tout le monde, incluant les experts. Si toutes les expertes avaient eu le temps adéquat pour se préparer, se calibrer, s'initier au concept des heuristiques et se familiariser avec des sujets qui n'étaient pas dans leur domaine premier d'expertise, l'analyse et la quantification des heuristiques n'auraient été nécessaires que dans le cas où les organisateurs auraient voulu attribuer un poids différent à chaque expert. Cette façon de procéder n'est pas toujours facilement réalisable en pratique et incorpore de la subjectivité additionnelle dans un modèle. Toutefois, grâce aux propriétés de l'approche bayésienne, ces informations pourront être utilisées comme données a priori pour les analyses de risques futures, à condition que cette subjectivité soit reconnue et incluse dans les modèles.

Les applications éventuelles de l'approche bayésienne en analyses de risques environnementaux pour caractériser les opinions et les incertitudes des experts nécessiteraient plus d'organisation et de planification que ce qui a été possible pour Santé Canada, considérant les contraintes temporelles. En effet, une élicitation efficace requiert une méthodologie rigoureuse et scientifique, semblable à une expérience effectuée en laboratoire ou encore à une étude épidémiologique. Le temps et les efforts déployés dans l'organisation et la planification d'un panel peuvent être beaucoup plus grands que l'élicitation elle-même. En fait, comme j'en ai fait mention plus

haut, l'étape d'élicitation doit être le résultat final d'un long processus de discussions et de calibration des experts.

Bibliographie

- Approches bayésiennes pour l'appréciation des risques (ABARI), visité le 14/08/07
<http://w3.iouy.inra.fr/unites/miaj/public/matrisq/Contacts/abari.welcome.html>
- Abramson, B., Brown, J., Edwards, W., Murphy, A. et Winkler, R.L. « Hailfinder: A Bayesian System for Forecasting Severe Weather », *International Journal of Forecasting*, vol. 12, 1996, p. 57-71.
- American Conference of Industrial Hygienists (ACGIH), visité le 09/08/07
<http://www.acgih.org/Events/Course/Hewett2.pdf>
- Adams, F.K. « Expert Elicitation and Bayesian Analysis of Construction Contract Risks: An Investigation », *Construction Management Economics*, vol. 24, 2006, p. 81-96.
- Albert, I., Grenier, E., Denis, J.B., Rousseau, J. « Quantitative Risk Assessment from Farm to Fork and Beyond: A Global Bayesian Approach Concerning Food-Borne Diseases », *Risk Analysis*, vol. 28, no 2, 2008, p. 557-571.
- Australian Center of Excellence for Risk Analysis (ACERA), visité le 09/08/07
<http://www.acera.unimelb.edu.au/>
<http://www.acera.unimelb.edu.au/materials/papers/Boneh2006.pdf>
- Bayesian Elicitation of Experts' Probabilities (BEEP), University of Sheffield, visité le 13/08/07
<http://www.shef.ac.uk/beep/>
- Berman, D.W. et Crump, K.S. « Update of Potency Factors for Asbestos-Related Lung Cancer and Mesothelioma », *Critical Review in Toxicology*, vol. 38, Suppl. 1, 2008a, p. 1-47.
- Berman, D.W. et Crump, K.S. « A Meta-Analysis of Asbestos-Related Cancer Risk that Addresses Fiber Size and Mineral Type », *Critical Review in Toxicology*, vol. 38, Suppl. 1, 2008b, p. 49-73.
- Berman, D.W. et Crump, K.S. « Final Draft: Technical Support Document for a Protocol to Assess Asbestos-Related Risk », Prepared for Mark Follensbee, Syracuse Research Corporation, Syracuse, NY, and the Office of Solid Waste and Emergency Response, U.S. EPA, Washington DC, 2003.
- Berman, D.W., Crump, K.S., Chatfield, E.J., Davis, J.M. et Jones, A.D. « The Sizes, Shapes, and Mineralogy of Asbestos Structures that

Induce Lung Tumors or Mesothelioma in AF/HAN Rats Following Inhalation », *Risk Analysis*, vol. 15, no 2, 1995, p. 181-195.

Berry, M. « Mesothelioma Incidence and Community Asbestos exposure », *Environmental Research*, vol. 75, no 1, 1997, p. 34-40.

British Geological Survey, World Mineral Production, Natural Environment Research Council. Keyworth, Nottingham, Royaume-Uni, 2008.

Callister, T. et Raggi, P. « Electron-Beam Computed Tomography: A Bayesian Approach to Risk Assessment », *American Journal of Cardiology*, vol. 88, 2001, p. 39E-41E.

Camus, M., Siemiatycki, J., Case, B.W., Désy, M., Richardson, L. et Campbell, S. « Risk of Mesothelioma Among Women Living Near Chrysotile Mines vs. U.S. E.P.A. Asbestos Risk Model - Preliminary Findings », *Annals of Occupational Hygiene*, vol. 46, Suppl.1, 2002, p. 95-98.

Camus, M., Siemiatycki, J. et Meek, B. « Non-Occupational Exposure to Chrysotile Asbestos and the Risk of Lung Cancer », *New England Journal of Medicine*, vol. 338, no 22, 1998, p. 1565-1571.

Center for Disease Control (CDC), visité le 23/08/07
<http://www.cdc.gov>

Center for Information Technology Leadership (CITL), visité le 09/08/07
<http://www.citl.org/>

Center for Research on Introduced Marine Pest (CRIMP), visité le 09/08/07
<http://www.marine.csiro.au/crimp/reports/CRIMPTechReport17.pdf>

Creely, K.S., Tickner, J., Soutar, A.J., Hughson, G.W., Pryde, D.E., Warren, N.D., Rae, R., Money, C., Phillips, A. et Cherrie, J.W. « Evaluation and Further Development of EASE Model 2.0. », *Annals of Occupational Hygiene*, vol. 49, 2005, p. 135-145.

Dagbert, M. « Études de corrélation d'empoussiérage dans l'industrie de l'amiante », Commission Beaudry, Document 5, 1976.

Daneshkhah, A., Oakley, J. et O'Hagan, A. « Non-Parametric Prior Elicitation with Imprecisely Assessed Probabilities », BEEP Working Paper, Sheffield, Royaume-Uni, 2006.

- Doll, R. et Peto, J. « Asbestos: Effects on Health of Exposure to Asbestos », U.K. Health and Safety Commission, Londres, Royaume-Uni, Her Majesty's Stationery Office, 1985.
- Eastern Research Group (ERG) « Report on the Peer Consultation Workshop to Discuss a Proposed Protocol to Assess Asbestos-Related Risk », Prepared for U.S. Environmental Protection Agency, Office of Washington, Washington, DC, 2003.
- Edwards, F.H., Albus, R.A., Zajtchuk, R., Graeber, G.M., Barry, M.J., Rumisek, J.D. et Arishita, G. « Use of a Bayesian Statistical Model for Risk Assessment in Coronary Artery Surgery », *Annals of Thoracic Surgery*, vol. 45, 1988, p. 437-440.
- Environmental Health Center (EHC), World Health Organization (WHO) et Task Group « Environmental Health Criteria 203: Chrysotile Asbestos », Environmental Health Criteria, Genève, Suisse, 1998.
- Englehardt, J.D. et Swartout, J. « Predictive Bayesian Microbial Dose-Response Assessment Based on Suggested Self-Organization in Primary Illness Response: *Cryptosporidium parvum* », *Risk Analysis*, vol. 26, no 2, 2006, p. 543-554.
- Environnement Canada, visité le 13/08/07
<http://www.ec.gc.ca/>
- Environmental Protection Agency (EPA), visité le 09/08/07
http://www.epa.gov/NCCT/uvpkm/files/Calibration_PreMeeting_Draft.pdf
- Euhus, D.M. « Understanding Mathematical Models for Breast Cancer Risk Assessment and Counseling », *Breast Journal*, vol. 7, 2001, p. 224-232.
- Faber, M.H. et Stewart, M.G. « Risk Assessment for Civil Engineering Facilities: Critical Overview and Discussion », *Reliability Engineering and System Safety*, vol. 80, 2003, p. 173-184.
- Faber, M.H., Kroon, I.B., Kragh, E., Bayly, D. et Decosemaeker, P. « Risk Assessment of Decommissioning Options Using Bayesian Networks », *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, vol. 124, 2002, p. 231-238.
- Garthwaite, P.H., Kadane, J.B. et O'Hagan, A. « Statistical Methods for Eliciting Probability Distributions », *Journal of the American Statistical Association*, vol. 100, 2005, p. 680-701.

- Gérin, M., Gosselin, P., Cordier, S., Viau, C., Quénel, P. et Dewailly, É. « Environnement et santé publique: fondements et pratiques », Canada, Éditions TEC & DOC, 2003.
- Gilovich, T., Griffin, D. et Kahneman, D. « Heuristics and Biases: The Psychology of Intuitive Judgment », New York, Cambridge University Press, 2002.
- Hansen, J., de Klerk, N.H., Musk, A.W. et Hobbs, M.S. « Environmental Exposure to Crocidolite and Mesothelioma: Exposure-Response Relationships », *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, vol. 157, no1, 1998, p. 69-75.
- Hawkins, N.C. et Graham, J.D. « Expert Scientific Judgment and Cancer Risk Assessment: A Pilot Study of Pharmacokinetic Data », *Risk Analysis*, vol. 8, no 4, 1988, p. 615–625.
- Health and Safety Executive (HSE), visité le 16/08/07
<http://www.hse.gov.uk>
http://www.hse.gov.uk/RESEARCH/crr_pdf/2000/crr00296.pdf
- Health Effects Institute - Asbestos Research (HEI-AR) « Asbestos in Public and Commercial Buildings: A Literature Review and Synthesis of Current Knowledge - Final Report », Cambridge, Massachusetts, 1991.
- Hodgson, J.T. et Darnton, A. « The Quantitative Risks of Mesothelioma and Lung Cancer in Relation to Asbestos Exposure », *Annals of Occupational Hygiene*, vol. 44, no 8, 2000, p. 565-601.
- Institut national de la santé et de la recherche médicale (Inserm) « Effets sur la santé des principaux types d'exposition à l'amiante », Paris, France, Les Éditions Inserm, 1997.
- International Society for Bayesian Analysis (ISBA), visité le 09/08/07
<http://www.bayesian.org/>
- International Society for Computational Biology (ISCB), visité le 09/08/07
<http://www.iscb.org/>
- Jacob, K.S. « Mental State Examination: The Elicitation of Symptoms » *Psychopathology*, vol. 36, 2003, p. 1-5.
- Jenkinson, D. « The Elicitation of Probabilities-A Review of the Statistical Literature », BEEP Working Paper, Sheffield, Royaume-Uni, 2005.

- Jonsson, F. et Johanson, G. « A Bayesian Analysis of the Influence of GSTT1 Polymorphism on the Cancer Risk Estimate for Dichloromethane », *Toxicology and Applied Pharmacology*, vol. 174, 2001, p. 99-112.
- L'Italien, G.J., Paul, S.D., Hendel, R.C., Leppo, J.A., Cohen, M.C., Fleisher, L.A., Brown, K.A., Zarich, S.W., Cambria, R.P., Cutler, B.S. et Eagle, K.A. « Development and Validation of a Bayesian Model for Perioperative Cardiac Risk Assessment in a Cohort of 1,081 Vascular Surgical Candidates », *Journal of the American College of Cardiology*, vol. 27, 1996, p. 779-786.
- Liao, K.H., Tan, Y.M., Conolly, R.B., Borghoff, S.J., Gargas, M.L., Andersen, M.E. et Clewell, H.J. « Bayesian Estimation of Pharmacokinetic and Pharmacodynamic Parameters in a Mode-of-Action-Based Cancer Risk Assessment for Chloroform », *Risk Analysis*, vol. 27, no 6, 2007, p. 1535-1551.
- Lichtenstein, S. et Fischhoff, B. « Training for Calibration », *Organizational Behavior and Human Performance*, vol. 26, 1980, p. 149-171.
- Lumina, visité le 09/08/07
<http://www.lumina.com/>
- Maglogiannis, I. et Zafiroopoulos, E. « Modeling Risk in Distributed Healthcare Information Systems », *Engineering in Medicine and Biology Society*, IEEE Conference, vol. 1, 2006, p. 5447-5450.
- Marshall, E.C. et Spiegelhalter, D.J. « Simulation-Based Tests for Divergent Behaviour in Hierarchical Models », *Bayesian Analysis*, vol. 2, 2007, p. 409-444.
- Marshall, E.C. et Spiegelhalter, D.J. « Approximate Cross-Validatory Predictive Checks in Disease-mapping Models », *Statistics in Medicine*, vol. 22, 2003, p. 1649-1660.
- Marshall, G., Shroyer, A.I., Grover, F.L. et Hammermeister, K.E. « Bayesian-logit Model for Risk Assessment in Coronary Artery Bypass Grafting », *Annals of Thoracic Surgery*, vol. 57, 1994, p. 1492-1499.
- McKendrick, I.J., Gettinby, G., Gu, Y., Reid, S.W.J. et Revie, C.W. « Using a Bayesian Belief Network to Aid Differential Diagnosis of Tropical Bovine Diseases », *Preventive Veterinary Medicine*, vol. 47, 2000, p. 141-156.

- Medina, M.A., Butcher, J.B. et Marin, C.M. (1989) « Monte Carlo Analysis and Bayesian Decision Theory for Assessing the Effects of Waste Sites on Groundwater. II. Applications », *Journal of Contaminant Hydrology*, vol. 5, 1989, p. 15-31.
- Meeker, G.P., Lowers, H.A., Swayze, G.A., Gosen, B.S.V., Sutley, S.J. et Brownfield, I.K. « Mineralogy and Morphology of Amphiboles Observed in Soils and Rocks in El Dorado Hills, California », *U.S. Geological Survey*, vol. 47, 2006.
- Meldrum, M. « Review of Fibre Toxicology », Sudbury, Suffolk, Royaume-Uni, Health and Safety Executive, 1996.
- Messner, M.J., Chappell, C.L. et Okhuysen, P.C. « Risk Assessment for Cryptosporidium: A Hierarchical Bayesian Analysis of Human Dose Response Data », *Water Research*, vol. 35, 2001, p. 3934-3940.
- Morgan, M.G. et Henrion, M. « Uncertainty - A Guide to Dealing with Uncertainty in Quantitative Risk and Policy Analysis », Cambridge, Royaume-Uni, Cambridge University Press, 1990.
- Morgan, M.G., Pitelka, L.F. et Shevliakova, E. « Elicitation of Expert Judgments of Climate Change Impacts on Forest Ecosystems », *Climate Change*, vol. 49, 2001, p. 279-307.
- Medical Research Council Biostatistics Unit (MRC), visité le 09/08/07
<http://www.mrc-bsu.cam.ac.uk/bugs/>
- Murphy, A.H. et Brown, B.G. « A Comparative Evaluation of Objective and Subjective Weather Forecasts in the United States », *Journal of Forecasting*, vol. 3, 1984, p. 369-393.
- Murphy, A.H. et Winkler, R.L. « Credible Interval Temperature Forecasting: Some Experimental Results », *Monthly Weather Review*, vol. 102, 1974, p. 784-794.
- Nordmann, J.P. et Berdeaux, G. « Use of a Bayesian Network to Predict the Nighttime Intraocular Pressure Peak from Daytime Measurements », *Clinical Therapeutics*, vol. 29, no 8, 2007, p. 1751-1760.
- Neutra, R.R., DelPizzo, V. et Lee, G.M. « An Evaluation of the Possible Risks from Electric and Magnetic Fields (EMFs) from Power Lines, Internal Wiring, Electrical Occupations, and Appliances - Final Report », *California EMF Program*, vol. 117, 2002.

Noetics Systems Incorporated, visité le 09/08/07
<http://www.noeticsystems.com/TR/technical.shtml>

Norsys, visité le 09/08/07
<http://www.norsys.com/clients.htm>

Ogino, S., Wilson, R.B., Gold, B. et Flodman, P. « Bayesian Risk Assessment in Genetic Testing for Autosomal Dominant Disorders with Age-Dependent Penetrance », *Journal of Genetic Counseling*, vol. 16, no 1, 2007, p. 29-39.

Ogino, S., Wilson, R.B. et Grody, W.W. « Bayesian Risk Assessment for Autosomal Recessive Diseases: Fetal Echogenic Bowel with One or No Detectable CFTR Mutation », *Journal of Medical Genetics*, vol. 41, 2004a, p. e70.

Ogino, S., Wilson, R.B., Gold, B., Hawley, P. et Grody, W.W. « Bayesian Analysis for Cystic Fibrosis Risks in Prenatal and Carrier Screening », *Journal of Medical Genetics*, vol. 6, 2004b, p. 439-449.

O'Hagan, A., Buck, C.E., Daneshkhah, A., Eiser, J.R., Garthwaite, P.H., Jenkinson, D.J., Oakley, J.E. et Rakow, T. « Uncertain Judgements: Eliciting Experts' Probabilities », West Sussex, Royaume-Uni, John Wiley & Sons Inc, 2006.

Paté-Cornell, M.E. « Fusion of Intelligence Information: A Bayesian Approach », *Risk Analysis*, vol. 22, no 3, 2002, p. 445-454.

Procaccia, H. et Suhner, M. « Démarche bayésienne et applications à la sûreté de fonctionnement », Paris, France, Lavoisier, 2003.

Ramachandran, G. « Toward Better Exposure Assessment Strategies--the New NIOSH Initiative », *Annals of Occupational Hygiene*, vol. 52, no 5, 2008, p. 297-301.

Ramachandran, G., Banerjee, S. et Vincent, J.H. « Expert Judgment and Occupational Hygiene: Application to Aerosol Speciation in the Nickel Primary Production Industry », *Annals of Occupational Hygiene*, vol. 47, 2003, p. 461-475.

Ramachandran, G. « Retrospective Exposure Assessment Using Bayesian Methods », *Annals Occupational Hygiene*, vol. 45, 2001, p. 651-667.

Ramas Ecological Software, visité le 14/08/07
<http://www.ramas.com/>

- Reckhow, K.H. « Water Quality Simulation Modeling and Uncertainty Analysis for Risk Assessment and Decision Making », *Ecological Modelling*, vol. 72, 1994, p. 1-20.
- Report from the Committee on Asbestos: Selected Health Effects, « Asbestos: Selected Cancers », National Academy of Sciences (NAS), Washington, DC, National Academies Press, 2006.
- Report from the Committee on Non-Occupational Health Risks of Asbestiform Fibers, « Asbestiform Fibers: Non-Occupational Health Risks », National Research Council (NRC), Washington, DC, National Academies Press, 1984.
- Resources for the Future (RFF), visité le 14/08/07
<http://www.rff.org/>
- Sandia National Laboratories, USA Government Department of National Security, visité le 09/08/07
<http://www.sandia.gov/>
- Santé Canada, visité le 13/08/07
http://www.hc-sc.gc.ca/index_f.html
- Secrétariat de la Convention de Rotterdam, « Inscription de l'amiante chrysotile à l'Annexe III de la Convention de Rotterdam, Conférence des Parties - Quatrième réunion », Rotterdam, Pays-Bas, 2008.
- Shelter Island Risk, visité le 09/08/07
<http://www.shelterislandrisk.com/>
- Siemens Communication, visité le 09/08/07
<http://www.cramm.com/>
- Slovic, P., Finucane, M.L., Peters, E., et MacGregor, D.G. « The Affect Heuristic », In Gilovich, Griffin et Kahneman (dir.), *Heuristics and biases: The psychology of intuitive judgment*, New York, Cambridge University Press, 2002.
- Society for Risk Analysis (SRA), visité le 09/08/07
<http://sra.org/index.php>
- Steventon, J.D., Sutherland, G.D. et Arcese, P. « A Population-Viability Based Risk Assessment of Marbled Murrelet Nesting Habitat Policy in British Columbia », *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 36, 2006, p. 3075-3086.

Stiber, N.A., Pantazidou, M. et Small, M.J. « Expert System Methodology for Evaluating Reductive Dechlorination at TCE sites », *Environmental Science and Technology*, vol. 33, 1999, p. 3012-3020.

Swiss Federal Institute of Technology Zurich, visité le 09/08/07
http://www.lsa.ethz.ch/index_EN

Tielemans, E., Warren, N., Schneider, T., Tischer, M., Ritchie, P., Goede, H., Kromhout, H., Van Hemmen, J. et Cherrie, J.W. « Tools for Regulatory Assessment of Occupational Exposure: Development and Challenges », *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, vol. 17, Suppl 1, 2007, p. S72-80.

Tversky, A. et Kahneman, D. « Judgement Under Uncertainty: Heuristics and Biases », *Science*, vol. 185, 1974, p. 1124-1131.

Tversky, A. et Kahneman, D. « Extensional Versus Intuitive Reasoning: The Conjunction Fallacy in Probability Judgment », *Psychological Review*, vol. 90, 1983, p. 293-315.

University of British Columbia, visité le 14/08/07
<http://www.cs.ubc.ca/~murphyk/Bayes/bnsoft.html>

University of North Texas, visité le 14/08/07
www.cerl.unt.edu/publications/2004/slides/ppt/baysian_disease_surveillance.ppt

Van der Gaag, L.C., Renooij, S., Witteveen, C.L.M., Aleman, B.M.P. et Taal, B.G. « Probabilities for a Probabilistic Network: A Case Study in Oesophageal Cancer », *Artificial Intelligence in Medicine*, vol. 25, 2002, p. 123-148.

Virta, R.L. « Worldwide Asbestos Supply and Consumption Trends from 1900 through 2003 », Reston, Virginia, U.S. Geological Survey, 2006.

Volinsky, C.T., Madigan, D., Raftery, A.E. et Kronmal, R.A. « Bayesian Model Averaging in Proportional Hazard Models: Assessing the Risk of a Stroke », *Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics)*, vol. 46, 1997, p. 433-448.

Wagner, J.C., Berry, G. et Pooley, F.D. « Carcinogenesis and Mineral Fibres », *British Medical Bulletin*, vol. 36, no 1, p. 53-56.

Walker, K.D., Catalano, P., Hammit, J.K. et Evans, J.S. « Use of Expert Judgment in Exposure Assessment- Part 2. Calibration of Expert

- Judgments About Personal Exposure to Benzene », *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*, vol. 13, 2003, p. 1-16.
- Walker, K.D., Evans, J.S. et Macintosh, D. « Use of Expert Judgment in Exposure Assessment- Part I. Characterization of Personal Exposure to Benzene », *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*, vol. 11, 2001, p. 308-322.
- Wang, J., Donnan, P.T. et MacDonald, T.M. « An Approximate Bayesian Risk-Analysis for the Gastro-Intestinal Safety of Ibuprofen », *Pharmacoepidemiology and Drug Safety*, vol. 11, 2002, p. 695-701.
- Wood, L. et Ford, J.M. « Structuring Interviews with Experts During Knowledge Elicitation », Ford et Bradshaw (dir.), *Knowledge Acquisition as Modeling*, New York, John Wiley and Sons Inc., 1993.
- Wraith, D. et Mengersen, K. « A Bayesian Approach to Assess Interaction Between Known Risk Factors: The Risk of Lung Cancer from Exposure to Asbestos and Smoking », *Statistical Methods in Medical Research*, vol. 17, 2008, p. 171-189.
- Yokley, K., Tran, H.T., Pekari, K., Rappaport, S., Riihimaki, V., Rothman, N., Waidyanatha, S. et Schlosser, P.M. « Physiologically-Based Pharmacokinetic Modeling of Benzene in Humans: a Bayesian Approach », *Risk Analysis*, vol. 26, no 4, 2006, p. 925-943.

Annexes

5.1 Annexe A : Revue des connaissances sur les applications de l'approche bayésienne

Le tableau A-1 contient les articles portant sur l'application de l'approche bayésienne dans différents secteurs d'application. Ces articles, décrits de façon condensée dans le tableau 1 du texte, rapportent les types d'événements analysés par l'approche bayésienne ainsi que les principales personnes qui l'utilisent. Finalement, les informations a priori rapportées par les auteurs pouvaient être objectives ou subjectives.

Tableau A-1 : Domaines et types d'applications de l'approche bayésienne

		Auteurs	Année	Source (G=Gov. U=Université, CR=Centre de Recherche, OP=Organisme privé, C=Compagnie)	Secteur d'application	Information a priori Subjective (S) vs. Objective (O)	Résumé
Événements rares	Risques aigus	Abramson et coll.	1996	U, CR	météorologie	S	Arbre bayésien pour la météorologie de catastrophe
		Maglogiannis et coll.	2006	U	clinique	O	Arbre bayésien permettant de prédire les erreurs dans les systèmes d'informations hospitaliers
		Marshall et coll.	1994	U, CR	clinique	O	Théorème bayésien utilisé pour prédire le taux de mortalité associé à une opération de pontage artériel
		Nordmann et coll.	2007	CR, G	clinique	O	Réseau bayésien utilisé pour prédire les niveaux de pressions oculaires durant la nuit chez les patients avec des glaucomes
		Paté-Cornell	2002	U	défense nationale	S	Méthodologie pour l'incorporation et la mise à jour de l'information de différentes sources
		Volinsky et coll.	1997	U	clinique	O	Modèle bayésien permettant d'estimer la probabilité d'une crise cardiaque

Tableau A-1 (suite): Domaines et types d'applications de l'approche bayésienne

		Auteurs	Année	Source (G=Gov. U=Université, CR=Centre de Recherche, OP=Organisme privé, C=Compagnie	Secteur d'applica- tion	Informa- tion <i>a priori</i> Subjective (S) vs. Objec- tive (O)	Résumé
Événements rares	Risques chroniques	Callister et coll.	2001	U, CR	clinique	O	Analyse bayésienne dans l'interprétation des données des ECBT pour les maladies coronaires des artères
		Englehardt et coll.	2006	U, G	épidémiologie	O	Modèle bayésien calculant les probabilités de maladies liées à des pathogènes rares
		Euhus	2001	U	clinique	O	Modèle bayésien permettant d'estimer le risque de cancer du sein en se basant sur l'histoire familiale
		Jacob	2003	U	clinique	S	Opinions d'experts utilisées pour émettre un diagnostic sur la santé mentale des patients
		Johnsson et coll.	2001	U, CR	génétique	O	Statistiques bayésiennes utilisées pour estimer le risque de cancer associé à des polymorphismes génétiques
		L'Italien et coll.	1996	U	épidémiologie	O	Modèle bayésien utilisé pour estimer les risques de cancer en se basant sur des données épidémiologiques
		Morgan et coll.	2001	U, CR	écologie	S	Opinions des experts utilisées pour estimer le risque des changements climatiques sur les écosystèmes
		Van der Gaag et coll.	2002	U, CR	clinique	S	Arbre bayésien construit à partir de données subjectives pour analyser les risques de cancer de l'oesophage
		Wraith et coll.	2008	U	épidémiologie	O,S	Méta-analyse de la littérature sur l'amiante en utilisant l'approche bayésienne pour l'interpréter

Tableau A-1 (suite): Domaines et types d'applications de l'approche bayésienne

		Auteurs	Année	Source (G=Gov. U=Université, CR=Centre de Recherche, OP=Organisme privé, C=Compagnie	Secteur d'applica- tion	Informa- tion <i>a priori</i> Subjective (S) vs. Objective (O)	Résumé
Événements fréquents	Risques aigus	Edwards	1988	U	clinique	O	Modèle bayésien permettant de calculer les risques associés à une opération au cœur
		Faber et coll.	2002	U, CR	ingénierie	O	Arbre bayésien utilisé pour estimer la probabilité qu'un processus de décommissions échoue
		Faber et coll.	2003	U, CR	ingénierie	O	Approche bayésienne utilisée dans le domaine de l'ingénierie civile pour incorporer des nouvelles données dans un modèle existant
		Ogino et coll.	2004	U, CR, OP	génétique	O	Analyse bayésienne pour calculer le risque de fibrose kystique chez les foetus
		Ogino et coll.	2004	U, CR, OP	génétique	O	Méthodes bayésiennes utilisées pour estimer le risque de maladies associées aux gènes récessifs
		Albert et coll.	2008	U, CR	santé publique	S	Arbre bayésien et simulation Monte Carlo pour modéliser les maladies reliées à l'alimentation
	Risques chroniques	Liao et coll.	2007	CR, C	toxicologie	O	Modèle pharmacocinétique des effets cancérigènes du chloroforme chez des rongeurs
		McKendrick et coll.	2000	U	médecine vétérinaire	S	Arbre bayésien utilisé pour réunir les opinions des experts sur les maladies bovines
		Medina et coll.	1989	U	santé environne- mentale	O	Théorie de la décision bayésienne pour prédire les effets des dépotoirs sur la qualité des eaux souterraines

Tableau A-1 (suite): Domaines et types d'applications de l'approche bayésienne

		Auteurs	Année	Source (G=Gov. U=Université, CR=Centre de Recherche, OP=Organisme privé, C=Compagnie	Secteur d'applica- tion	Informa- tion a priori Subjec- tive (S) vs. Objec- tive (O)	Résumé
Événements fréquents	Risques chroniques	Messner et coll.	2001	U, OP	épidémio- logie	O	Méta-analyse des études dose- réponse pour le Cryptosporidium utilisant l'approche bayésienne
		Ramachandran	2001	U	santé publique	S	Jugements d'experts utilisés pour estimer l'exposition des travailleurs au nickel
		Ramachandran et coll.	2003	U	santé publique	S	Processus bayésien utilisé pour estimer l'exposition des travailleurs à quatre types de nickel à douze endroits différents
		Reckhow	1994	U, OP	santé environne- mentale	S	Explique l'utilité de l'analyse bayésienne pour incorporer les incertitudes dans les modèles portant sur la qualité des méthodes de transport de l'eau
		Steventon et coll.	2006	U, G	écologie	S	Usage d'un arbre bayésien pour analyser la probabilité qu'une espèce persiste dans un environnement
		Stiber et coll.	1999	U	santé environne- mentale	S	Des jugements d'experts jumelés à des données recueillies sont utilisés pour estimer les taux de déchloration
		Walker et coll.	2001	U, CR, G	santé environne- mentale	S	Utilisation de jugements d'experts pour mesurer l'exposition au benzène

Tableau A-1 (suite): Domaines et types d'applications de l'approche bayésienne

		Auteurs	Année	Source (G=Gov. U=Université, CR=Centre de Recherche, OP=Organisme privé, C=Compagnie	Secteur d'applica- tion	Informa- tion a priori Subjec- tive (S) vs. Objec- tive (O)	Résumé
Événements fréquents	Risques chroniques	Walker et coll.	2003	U, CR, G	santé environne- mentale	S	Utilisation de jugements d'experts pour mesurer l'exposition au benzène
		Wang et coll.	2002	U	épidémio- logie	O	Approche bayésienne utilisée pour mettre à jour les informations sur les relations dose-réponses de l'ibuprofène
		Yokley et coll.	2006	U, CR, G	toxicologie	O	Approche bayésienne utilisée dans un modèle pharmacocinétique permettant de prédire l'effet du benzène à faibles doses chez l'humain

Le tableau A-2 contient les sites Internet portant sur l'application de l'approche bayésienne dans différents secteurs d'application. Ce tableau démontre aussi les types d'auteurs de ces sites.

Tableau A-2: Sites internet portant sur l'analyse bayésienne et ses applications

Site	Lien	Type d'auteur (G= Site gouvernement al,CR= Centre de recherche, OP= Organisme privé, U=Université et C= Compagnie)
ABARI centre de recherche	http://w3.jouy.inra.fr/unites/miaj/public/matrisq/Contacts/abari.welcome.html	CR
Center for Disease Control	http://www.cdc.gov	G
CITL	http://www.citl.org	OP
International Society for Bayesian Analysis (ISBA)	http://www.bayesian.org	OP
International society for computational biology	http://www.iscb.org/	OP
Lumina website	http://www.lumina.com	C
Norsys	http://www.norsys.com/clients.htm	C
Ramas Ecological Software	http://www.ramas.com	OP
Resources for the Future	http://www.rff.org	OP
Sandia National Laboratories, USA government department of national security	http://www.sandia.gov	G

Tableau A-2 (suite): Sites internet portant sur l'analyse bayésienne et ses applications

Site	Lien	Type d'auteur (G= Site gouvernement al, CR= Centre de recherche, OP= Organisme privé, U=Université et C= Compagnie)
Shelter Island Risk	http://www.shelterislandrisk.com	C
Siemens Communication	http://www.cramm.com/	C
Swiss Federal Institute of Technology Zurich	http://www.lsa.ethz.ch/index_EN	G
Université de Californie	http://www.biostat.wustl.edu/archives/html/s-news/2004-06/msg00112.html	U
Université de North Texas	www.cerl.unt.edu/publications/2004/slides/ppt/baysian_disease_surveillance.ppt	U
UK Health and Safety Executive	http://www.hse.gov.uk	G
US EPA site gouvernemental	http://es.epa.gov/ncer/publications/workshop/pdf/11_03_05_lamon.pdf	G

5.2 Annexe B : Exemple de démarche pour effectuer une analyse bayésienne rigoureuse

ELICITATION RECORD – Part 1 – Context

Elicitation title	
Session	
Date	
Part 1 start time	

Attendance and roles	
Purpose of elicitation	
This record	Participants are aware that this elicitation will be conducted using the Sheffield Elicitation Framework, and that this document, including attachments, will form a record of the session.
Orientation and training	
Participants' expertise	
Declarations of interests	
Strengths and weaknesses	
Definitions	

Part 1 end time	
Attachments	

ELICITATION RECORD – Part 2 – Distribution

Probability Method

Elicitation title	
Session	
Date	
Quantity	
Start time	

Definition	
Evidence	
Plausible range	
Median	
Probabilities	
Fitting	
Group elicitation	
Fitting and feedback	
Chosen distribution	
Discussion	

End time	
Attachments	