

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

DÉFAILLANCE D'UN RÉSEAU DE SUPPORT À LA VIE :
APPLICATION DE LA LOGIQUE FLOUE DANS L'ÉVALUATION DES
CONSÉQUENCES

VINCENT DEHAIL

DÉPARTEMENT DES GÉNIES CIVIL, GÉOLOGIQUE ET DES MINES
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE CIVIL)
DÉCEMBRE 2003



National Library
of Canada

Bibliothèque nationale
du Canada

Acquisitions and
Bibliographic Services

Acquisitions et
services bibliographiques

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence

ISBN: 0-612-89194-1

Our file Notre référence

ISBN: 0-612-89194-1

The author has granted a non-exclusive licence allowing the National Library of Canada to reproduce, loan, distribute or sell copies of this thesis in microform, paper or electronic formats.

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque nationale du Canada de reproduire, prêter, distribuer ou vendre des copies de cette thèse sous la forme de microfiche/film, de reproduction sur papier ou sur format électronique.

The author retains ownership of the copyright in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur qui protège cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms may have been removed from this dissertation.

Conformément à la loi canadienne sur la protection de la vie privée, quelques formulaires secondaires ont été enlevés de ce manuscrit.

While these forms may be included in the document page count, their removal does not represent any loss of content from the dissertation.

Bien que ces formulaires aient inclus dans la pagination, il n'y aura aucun contenu manquant.

Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé:

DÉFAILLANCE D'UN RÉSEAU DE SUPPORT À LA VIE :
APPLICATION DE LA LOGIQUE FLOUE DANS L'ÉVALUATION DES
CONSÉQUENCES

présenté par: DEHAIL Vincent

en vue de l'obtention du diplôme de: Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de:

M. KAHAWITA René, Ph.D., président

M. MARCHE Claude, D.Sc.A., membre et directeur de recherche

M. ROBERT Benoît, Ph.D., membre et codirecteur de recherche

M. LAVALLÉE Marc, M.Sc.A., membre

REMERCIEMENTS

Je remercie M. Benoît ROBERT qui a dirigé ce travail de recherche. Sa disponibilité pour être à l'écoute de l'avancement de mon travail a fait qu'il fut particulièrement agréable de travailler avec lui. Il m'a notamment permis de faire mûrir mes réflexions et la manière d'aborder un problème. Je le remercie également vivement pour son soutien financier.

Je souhaite aussi remercier mes collègues du Centre Risque & Performance avec qui j'ai pu échanger une multitude d'idées et de réflexions dans un contexte multidisciplinaire à l'image de celui de la gestion des risques.

Enfin, je remercie le Dr Allard de l'Institut National de Santé Publique du Québec (INSPQ) pour les données qu'elle m'a fournies sur les risques à la santé associés à la présence de moisissures.

RÉSUMÉ

En gestion des risques, l'étude des conséquences peut être suffisante pour la planification des mesures d'urgence. Ce mémoire présente une méthodologie pour analyser et évaluer les conséquences d'une défaillance d'un réseau de support à la vie tels les réseaux de gaz, d'eau potable, d'électricité, de télécommunication, etc. Dans un premier temps, les concepts nécessaires à la mise en place de cette approche systémique sont définis. L'utilisation de la logique floue permet de formaliser l'incertitude sur les variables qui entrent en jeu dans l'analyse des conséquences. Ainsi dans un second temps, les principes de la logique floue utilisés dans la méthodologie sont présentés. Dans une troisième partie, les différentes étapes de la méthodologie sont illustrées par un exemple sur un réseau d'eau potable. La solution proposée fournit une évaluation des conséquences pour chaque niveau de défaillance et n'est pas tributaire de scénarios. Les résultats sont fournis sous formes de courbes, outils intéressants pour la planification des mesures d'urgences. Enfin, cette approche a été appliquée à l'étude de conséquences des fuites du réseau de distribution de l'eau potable sur la santé humaine par l'intermédiaire du développement des moisissures.

ABSTRACT

In risk assessment, the study of consequences can be sufficient to the planning of emergency measures. This dissertation presents a methodology to analyse and evaluate the consequences of the failure of a lifeline network like the gas network, drinking water, electricity, telecommunication networks, etc. Firstly, the required concepts to set up this systemic approach are defined. The use of fuzzy logic allows to formalize the incertitude on variables used in consequences analysis. In a second time, the principles of fuzzy logic used in the methodology are presented. Thirdly, the different steps of the methodology are illustrated by an example on a drinking water network. The solution proposed gives an evaluation of the consequences for every level of deficiency independently of scenarios. The results are given in plots which are interesting tools for the planning of emergency measures. Finally, this approach has been applied to the study of the consequences of leaks in the water distribution network on human health via the development of mould.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	IV
RÉSUMÉ	V
ABSTRACT	VI
TABLE DES MATIÈRES	VII
LISTES DES TABLEAUX	XI
LISTE DES FIGURES	XII
LISTE DES ANNEXES	XIV
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 : DÉFINITIONS	3
1.1 Réseau de support à la vie	3
1.2 Missions	5
1.3 Paramètre de mission	8
1.4 Valeur pivot du paramètre de mission	9
1.5 Ampleur de la défaillance	9
1.6 Éléments potentiellement touchés	10
1.7 Conséquences	13
1.7.1 Définition	13
1.7.2 Caractérisation	14
1.8 Indicateurs de conséquences	17

1.9	Facteurs aggravants.....	17
CHAPITRE 2 : UTILISATION DE LA LOGIQUE FLOUE		21
2.1	La logique floue	21
2.2	La logique floue dans l'évaluation des conséquences.....	22
2.3	Définition des classes et fonction d'appartenance (Quantification floue).....	23
2.4	Limites entre les classes	25
2.4.1	Stricte	25
2.4.2	Linéaire	26
2.4.3	Transition courbe	26
2.5	Règles linguistiques	27
2.6	Défuzzification	29
CHAPITRE 3 : MÉTHODOLOGIE PROPOSÉE		33
3.1	Application de la logique floue.....	33
3.1.1	Variables d'entrée et de sortie.....	33
3.1.2	Définition des classes ou quantification floue.....	34
3.1.3	Définition des règles.....	36
3.1.4	Défuzzification.....	37
3.2	Méthodologie.....	38
3.2.1	Étape 1 : définition de la mission, du paramètre et de la valeur pivot.....	38
3.2.2	Étape 2 : définition des classes d'ampleur de défaillance	39

3.2.3	Étape 3 : définition des éléments potentiellement touchés et de leurs indicateurs	44
3.2.4	Étape 4 : définition des classes d'indicateurs	45
3.2.5	Étape 5 : étude de l'influence des facteurs aggravants	46
3.2.6	Étape 6 : définition des règles linguistiques	48
3.2.7	Étape 7 : défuzzification	50
3.2.8	Étape 8 : représentation des résultats	54
 CHAPITRE 4 : Application - Intégration des conséquences		
	d'inondation sur la santé humaine	60
4.1	Problématique	60
4.2	Formalisation de la problématique	60
4.3	Méthodologie	61
4.3.1	Étape 1 : définition de la mission, du paramètre et du pivot	61
4.3.2	Étape 2 : définition des classes d'ampleur de défaillance	63
4.3.3	Étape 3 : définition des éléments potentiellement touchés et de leurs indicateurs	65
4.3.4	Étape 4 : définition des classes d'indicateurs	68
4.3.5	Étape 5 : étude de l'influence des facteurs aggravants	70
4.3.6	Étape 6 : définition des règles linguistiques	71
4.3.7	Étape 7 : défuzzification	73
4.3.8	Étape 8 : représentation des résultats	73
4.3.9	Utilisation des résultats	77

CONCLUSION	82
RÉFÉRENCES	85
ANNEXE.....	88

LISTES DES TABLEAUX

Tableau 1-1 : Éléments potentiellement touchés	12
Tableau 1-2 : Éléments potentiellement touchés du réseau d'eau potable.....	13
Tableau 1-3 : Indicateurs de conséquences	17
Tableau 2-1 : Exemple de règles linguistiques	28
Tableau 3-1 : Règles linguistiques entre les paramètres	49
Tableau 3-2 : Valeurs des taux d'appartenance	51
Tableau 4-1 : Règles linguistiques donnant les classes de qualité de l'air	72

LISTE DES FIGURES

Figure 1-1 : Fonctionnement d'un RSV (Robert et al. 2003).....	4
Figure 1-2 : Exemple de missions d'un réseau.....	7
Figure 1-3 : Représentation conceptuelle des conséquences.....	14
Figure 1-4 : Différents types d'effets domino.....	16
Figure 1-5 : Définition des éléments nécessaires à la méthodologie.....	20
Figure 2-1 : Exemple d'une fonction d'appartenance.....	24
Figure 2-2 : Exemple de classes de variable.....	25
Figure 2-3 : Transition stricte entre les classes.....	25
Figure 2-4 : Transition linéaire entre les classes.....	26
Figure 2-5 : Transition courbe entre les classes.....	26
Figure 2-6 : Trapèze tronqué.....	31
Figure 3-1 : Représentation de la classe 1.....	40
Figure 3-2 : Représentation de la classe 2.....	41
Figure 3-3 : Représentation de la classe 3.....	41
Figure 3-4 : Représentation de la classe 4.....	42
Figure 3-5 : Quantification floue de l'ampleur de la défaillance.....	44
Figure 3-6 : Quantification floue du nombre de personnes touchées.....	46
Figure 3-7 : Interprétation de la quantification floue.....	50
Figure 3-8 : Troncature du trapèze de la classe Faible.....	52

Figure 3-9 : Nombre de personnes touchées pour une ampleur de défaillance

320 kPa 53

Figure 3-10 : Nombre de personnes touchées en fonction de l'ampleur de la

défaillance 56

Figure 3-11 : Méthodologie globale 59

Figure 4-1 : Formalisation des conséquences 61

Figure 4-2 : Répartition des fuites à Colmar 63

Figure 4-3 : Quantification floue de l'ampleur de défaillance 65

Figure 4-4 : Quantification floue de la qualité de l'air 70

Figure 4-5 : Quantification floue de la durée 71

Figure 4-6 : Qualité de l'air en fonction de l'ampleur de la défaillance 74

Figure 4-7 : Qualité de l'air en fonction de la durée de la défaillance 74

Figure 4-8 : Qualité de l'air en fonction de l'ampleur et la durée de la

défaillance 76

Figure 4-9 : Interprétation 77

Figure 4-10 : Conséquences réversibles et irréversibles 79

Figure 4-11 : Retour à la normale 80

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE 1 : Calcul de l'aire sous une fonction d'appartenance trapézoïdale et de son centre de gravité.....	89
---	----

INTRODUCTION

Ouragans, verglas, terrorisme... S'il est souvent difficile de prévoir une catastrophe, il est encore moins aisé de connaître les conséquences qui en découlent. Même plusieurs années après les événements, ces dernières ne sont pas toujours entièrement connues.

La notion de risque intègre à la fois les probabilités ou les possibilités d'apparition d'un événement et les conséquences qui en découlent. En gestion des risques, il existe plusieurs approches selon les domaines d'application. Certaines privilégient les causes en se concentrant sur les probabilités d'apparition des événements alors que d'autres sont davantage axées sur l'étude des conséquences. L'objet de ce travail est de présenter une méthodologie d'étude des conséquences. Dans bien des cas, la connaissance des conséquences est prépondérante. Dans le domaine des mesures d'urgence par exemple, le fait de connaître à l'avance les conséquences possibles permet de définir des mesures de gestion de crise.

La tempête du verglas en janvier 1998, et la panne électrique qui a paralysé l'Ontario et le Nord-Est des États-Unis en août 2003 l'ont montré, les infrastructures les plus essentielles dans nos sociétés sont les réseaux de support à la vie. En effet, que serions-nous sans électricité ni eau potable ou bien si nous ne pouvions plus utiliser le téléphone ? Malheureusement, les

exemples ne manquent pas. De telles infrastructures méritent d'autant plus d'être étudiées qu'elles sont fortement dépendantes les unes des autres.

Le Centre risque & performance de l'École Polytechnique de Montréal concentre ses activités sur l'évaluation des risques et leur intégration dans les mesures d'urgence relatives aux réseaux de support à la vie. C'est dans ce contexte que le présent mémoire présente une méthode d'évaluation des conséquences. L'objectif de la méthode est de fournir les conséquences pour tous les niveaux de défaillance d'une mission en faisant abstraction de l'étude des scénarios qui restent très limitatifs. La méthodologie se veut pratique et s'appuie sur les théories de la logique floue. En effet, la logique floue permet de fournir des résultats précis à partir de données incertaines à l'image des connaissances humaines. Elle peut s'appliquer lorsque qu'il est difficile d'établir des limites strictes entre différents états d'une variable. Comme l'appréciation des variables génératrices de conséquences est souvent de nature qualitative, la logique s'applique bien à cette problématique. Toutefois nous trouvons peu de références dans la littérature qui mentionnent l'utilisation de la logique floue dans l'évaluation des conséquences.

Après avoir défini les termes nécessaires à sa mise en place, nous exposons une méthodologie d'étude des conséquences d'une défaillance d'un réseau de support à la vie. Enfin, nous proposons un exemple d'application de la méthode développée aux conséquences d'inondations sur la santé humaine.

CHAPITRE 1 : DÉFINITIONS

Dans ce premier chapitre, nous définissons les termes nécessaires à la compréhension du cadre de l'étude et de la méthodologie développée dans le chapitre 3.

1.1 Réseau de support à la vie

Les Réseaux de Support à la Vie (RSV) sont des ensembles d'infrastructures civiles reliées physiquement, contrôlées par des opérations et dont la défaillance des missions affecte à plus ou moins long terme la santé et la sécurité de la collectivité. Un RSV transporte un élément qui peut être soit un service, soit une substance (Robert et al. 2003). Les réseaux peuvent être maillés comme le réseau électrique ou répartis comme le réseau du service incendie. Un réseau se compose d'un ensemble d'opérations et d'infrastructures. Les opérations correspondent au processus technique permettant des actions directes ou indirectes sur l'ensemble ou des parties du réseau alors que les infrastructures correspondent à des installations nécessaires à la réalisation des opérations (Robert et al. 2003). Un réseau entre en défaillance lorsqu'il ne remplit plus ou partiellement ses missions, suite

aux dysfonctionnements d'une ou plusieurs opérations et/ou infrastructures. La Figure 1-1 présente un modèle de fonctionnement d'un réseau.

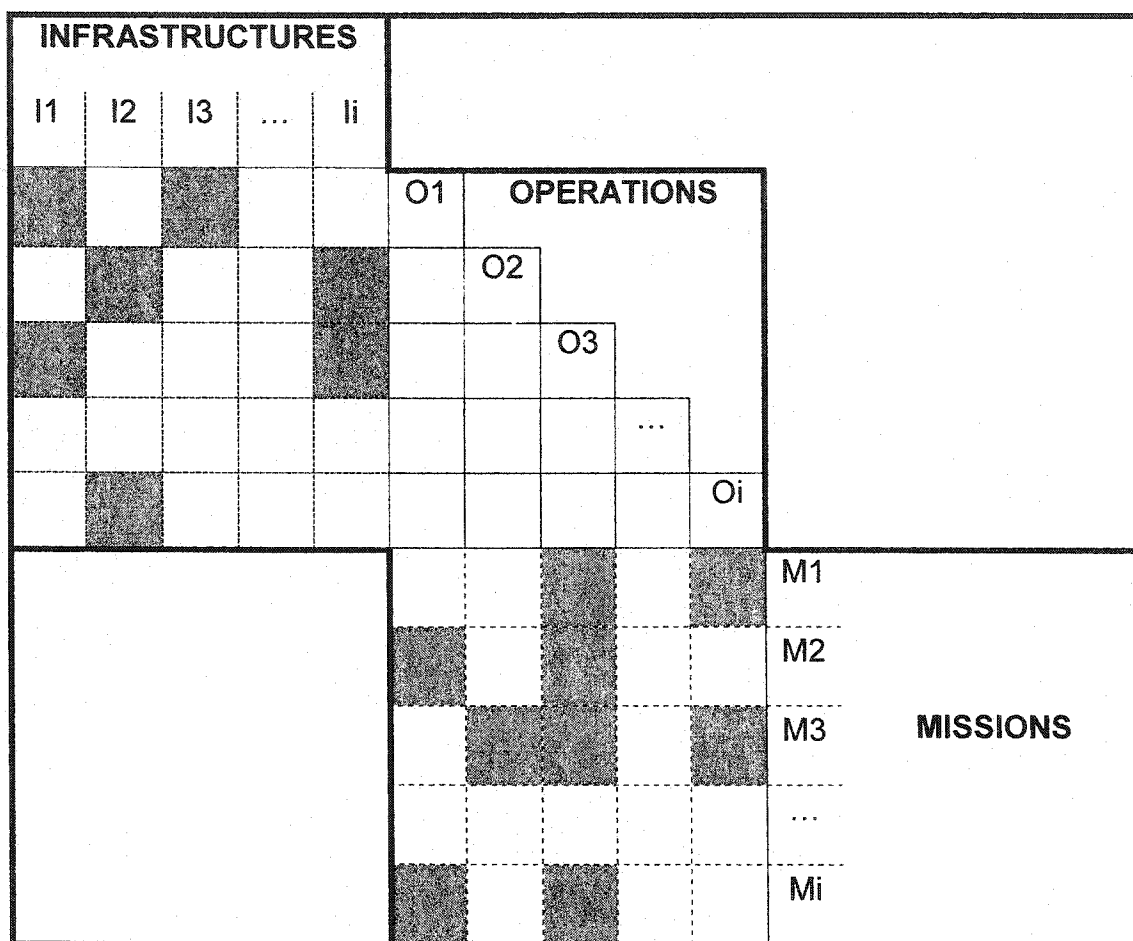


Figure 1-1 : Fonctionnement d'un RSV (Robert et al. 2003)

La Figure 1-1 peut se lire de la manière suivante. Pour être réalisée, la mission M2 a besoin des opérations O1 et O3. Les infrastructures I1 et I3 entrent en jeu dans la réalisation de l'opération O1. Cette modélisation permet d'avoir une approche systémique du fonctionnement d'un réseau.

Les réseaux de support à la vie fournissent un certain nombre de missions à la collectivité. Dans l'étude d'évaluation des conséquences, le point de départ est la mission. L'objectif est de donner une évaluation des conséquences pour tout niveau de réalisation de la mission. De cette manière, nous pouvons nous affranchir de l'origine des défaillances qui peuvent être multiples. L'étude de l'origine des défaillances correspond à l'analyse de la vulnérabilité qui ne fait pas l'objet de ce travail mais qui y est plutôt complémentaire.

1.2 Missions

Une mission d'un réseau de support à la vie correspond à une fonction pour laquelle il a été conçu et construit (Robert et al. 2003).

Les missions peuvent résulter :

1. des contraintes de conception du réseau ;
2. des obligations imposées par un tiers.

Les contraintes de conception sont exigées par les caractéristiques de fonctionnement du réseau (pression d'alimentation pour le réseau d'eau potable, intensité pour le réseau électrique). Les obligations imposées par un tiers peuvent être de différentes natures. Elles peuvent être sous forme d'exigences légales, de normes environnementales, ou d'exigences internes de performance (objectifs de rentabilité, lois sur l'environnement).

Ainsi la définition des missions est plus précise que la fonction principale du réseau. L'identification des missions passe par une analyse du fonctionnement du réseau. Les missions peuvent être imbriquées les unes dans les autres. Il est possible de décomposer la fonction principale du réseau en missions, elles-mêmes divisibles en missions plus détaillées. Cette identification des missions peut être présentée sous forme d'arborescence. La décomposition s'arrête lorsqu'un paramètre tangible est identifié. Ce paramètre doit être un indicateur du niveau de réalisation de la mission. Dans la suite, nous appellerons ce paramètre, paramètre de mission.

Un exemple de décomposition des missions pour le réseau d'eau potable est représenté à la Figure 1-2.

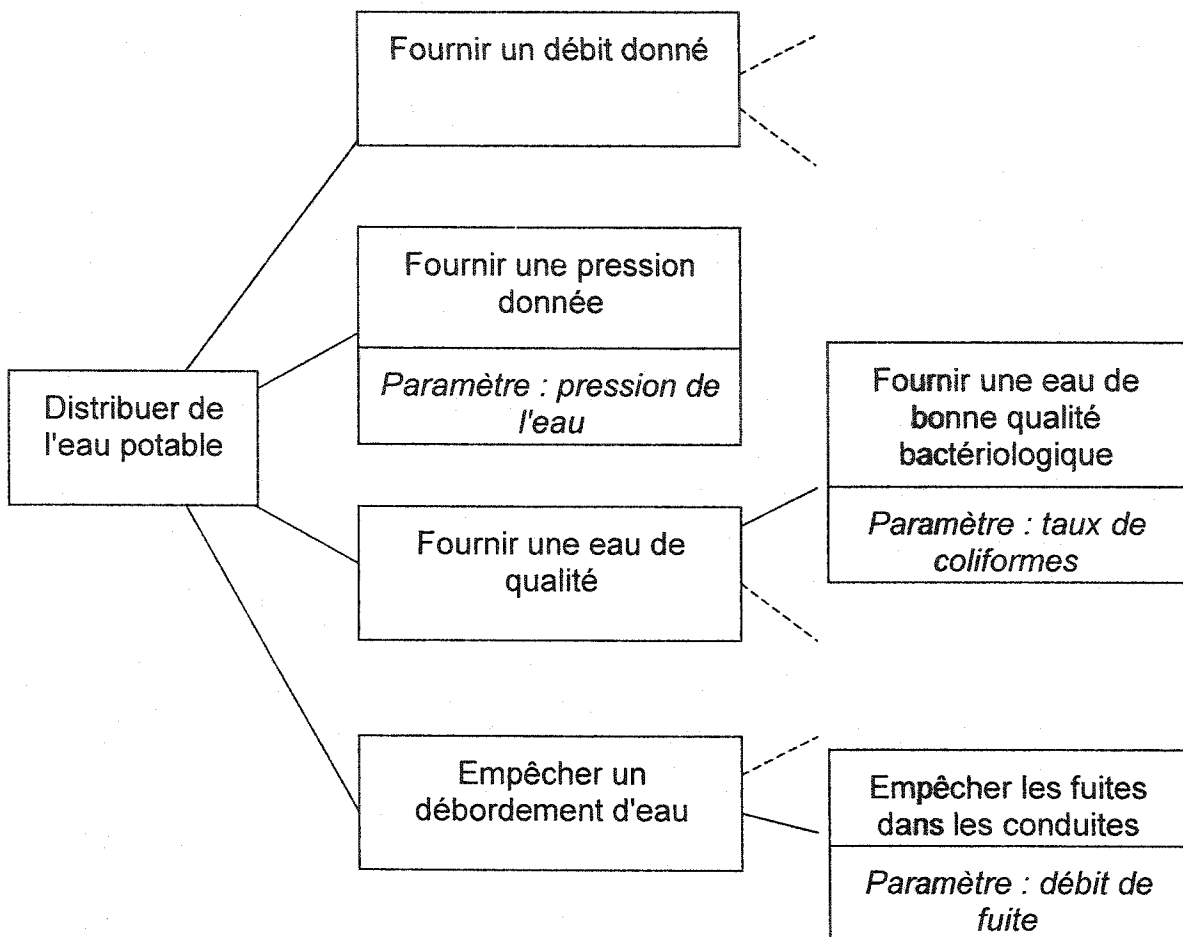


Figure 1-2 : Exemple de missions d'un réseau

Nous donnons ici plusieurs critères permettant de qualifier une mission.

- **discrète** : les niveaux de réalisation de la mission prennent seulement un nombre fini de valeurs
- **continue** : tous les niveaux de réalisation des missions sont possibles

- **transport de substance** : la mission est associée au transport d'une substance
- **service** : la mission est associée à la fourniture d'un service
- **obligation** : la mission résulte d'une obligation imposée par un tiers
- **conception** : la mission résulte d'une contrainte de conception
- **destinataires** : les destinataires de la mission sont les clients des réseaux ou des utilisateurs définis
- **milieu** : le milieu de la mission est l'environnement physique à proximité du réseau

Ces critères permettent d'analyser et de définir les missions d'un réseau.

1.3 Paramètre de mission

Un paramètre principal qualifie une mission. Ce paramètre peut être de nature quantitative ou qualitative. La Figure 1-2 donne des exemples de paramètres de missions comme le débit de fuite ou le taux de coliformes. Le paramètre peut être de nature continue lorsqu'il peut prendre une infinité de valeurs (pression de l'eau dans les conduites par exemple) ou de nature discrète lorsqu'il peut prendre un nombre fini de valeurs (le niveau de sécurité par exemple : 1, 2, 3, 4 ou 5) Avec le paramètre, nous devons définir l'ensemble de valeurs qu'il peut prendre. Cet ensemble peut être un intervalle ou un ensemble de valeurs discrètes.

1.4 Valeur pivot du paramètre de mission

Il existe une valeur pivot pour ce paramètre de mission que nous pouvons définir avec l'accord du gestionnaire du réseau. Au-delà de cette valeur, des conséquences significatives pour le gestionnaire apparaissent. Par exemple pour la mission qui consiste à assurer une pression suffisamment élevée dans le réseau d'eau potable, la valeur pivot du paramètre pression pourra être fixée à 500 kPa. En effet, nous pouvons considérer qu'en de dessous de 500 kPa, la pression n'est plus suffisante pour alimenter les immeubles élevés et donc que des conséquences peuvent apparaître. Dans la suite, nous appellerons P_0 cette valeur pivot du paramètre.

1.5 Ampleur de la défaillance

Une mission entre en défaillance lorsqu'elle commence à générer des conséquences.

Lorsque le paramètre de la mission va au-delà de cette valeur pivot P_0 , les conséquences apparaissent. L'ampleur de la défaillance est l'écart $|P - P_0|$ avec:

P , la valeur du paramètre de la mission;

P_0 , la valeur pivot du paramètre de la mission.

L'utilisation de l'ampleur de défaillance nous paraît plus représentative que le paramètre car elle représente l'éloignement par rapport à une situation acceptable.

1.6 Éléments potentiellement touchés

Les Éléments Potentiellement Touchés (EPT) sont les éléments qui peuvent subir les conséquences d'une défaillance du réseau. Ces éléments sont choisis et définis par le gestionnaire du réseau en fonction de l'orientation qu'il souhaite donner à l'étude de conséquences.

Les éléments potentiellement touchés doivent satisfaire aux conditions suivantes:

1. Complétude : ils doivent couvrir l'ensemble des éléments de l'environnement de mesure d'urgence. Pour satisfaire à cette condition, nous pouvons partir d'éléments généraux que nous pouvons ensuite décomposer. De cette manière nous évitons tout recoupement des éléments. Ainsi, idéalement, nous pourrions décrire toutes les conséquences de manière systématique.
2. Structuration : ils doivent être structurés pour pouvoir être utilisés de manière standardisée. En effet, la défaillance d'un EPT peut à son tour entraîner des conséquences sur d'autres EPT. Leur structuration permettra l'étude des conséquences indirectes via les effets domino même si nous

n'abordons pas cette problématique dans ce mémoire. De plus, cette standardisation permettra une comparaison entre des études de conséquences de différents réseaux.

3. Précision : ils doivent être suffisamment précis pour que le lien avec la mission défaillante soit identifiable. En effet, s'ils sont trop vagues comme 'Écosystème' par exemple, il se peut que la relation de cause à effet entre la défaillance de la mission et l'élément potentiellement touché soit difficilement identifiable. Il faudra alors détailler l'élément. Par exemple, nous pourrions décomposer l'élément 'Écosystème' en 'air', 'mer', 'terre', 'faune'. Il sera alors plus facile d'établir une corrélation entre la défaillance d'une mission et chacun de ces éléments plutôt qu'avec l'élément 'Écosystème'.
4. Mesurables : ils doivent être mesurables par des indicateurs tangibles de façon à pouvoir évaluer leur état. Cette mesure de l'état des éléments est une mesure des conséquences. Un exemple d'un indicateur pourrait être le 'nombre de casernes de pompiers touchées'.

Nous donnons dans le Tableau 1-1 une liste de référence d'éléments qui peuvent être touchés par la défaillance d'une mission du réseau étudié. Cette liste est non exhaustive et le gestionnaire de réseau pourra ajouter ou supprimer des éléments selon ses propres critères. De même, les éléments de cette liste pourront être décomposés. Des travaux sont en cours au Centre risque & performance pour raffiner cette matrice.

Tableau 1-1 : Éléments potentiellement touchés

Population		Santé
		Travail
		Sécurité
		Biens
Éléments de mesure d'urgence	Éléments de gestion de crise	Hôpitaux
		Police
		Mairie
		Pompiers
		Autre
	Éléments sensibles de support à la vie	Eau potable
		Eaux usées
		Transport en commun
		Transport
		Gaz
		Télécommunication
		Électricité
		Hôpitaux
	Éléments sensibles	Autre
		Industries chimiques
		Industries
		Agriculture
		Secteur des services
	Réseau étudié	École
		Autre
Infrastructures		
Missions		
Écosystème	Personnel	
	Pertes financières	
	Air	
	Mer	
	Terre	
	Faune	

Les éléments des réseaux de support à la vie pourront être détaillés par leurs missions, ainsi, par exemple, le réseau d'eau potable pourra être décomposé dans le Tableau 1-2 :

Tableau 1-2 : Éléments potentiellement touchés du réseau d'eau potable

Éléments de mesure d'urgence	Éléments sensibles de support à la vie	Réseau d'eau potable Distribuer de l'eau potable	Fournir un débit donné
			Fournir une pression donnée
			Fournir une eau de qualité
			Empêcher un débordement d'eau
		...	
	...	...	

1.7 Conséquences

1.7.1 Définition

Les conséquences d'une défaillance d'une mission peuvent être définies comme la dégradation d'un élément suite à cette défaillance.

Le flux de conséquence est le transfert d'une défaillance vers un élément touché (Figure 1-3). Un des objectifs d'une étude de conséquences est de caractériser ce flux. Le transfert de conséquences n'est possible que par la présence d'un lien entre la mission et l'élément touché.

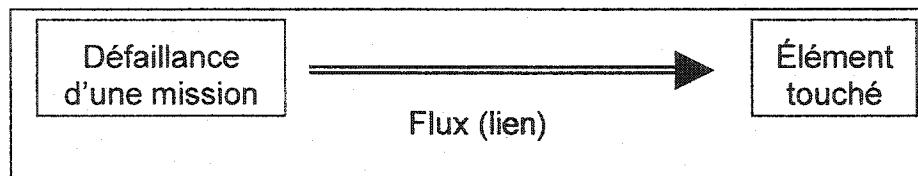


Figure 1-3 : Représentation conceptuelle des conséquences

1.7.2 Caractérisation

Nous proposons plusieurs types de caractérisation des conséquences. Cette typologie peut constituer un outil pour identifier de manière systématique les conséquences.

Tangibles / Intangibles :

Une conséquence est dite tangible lorsque l'on peut en faire une évaluation. Il faudra définir des unités d'évaluation de ces conséquences (monétaire, pertes,...).

Au contraire, une conséquence est dite intangible lorsque l'on sent une dépréciation de l'élément touché sans pouvoir l'évaluer. Il faudra essayer de repousser les limites de l'intangibilité en trouvant des moyens d'évaluation de ces conséquences.

Directes / Indirectes

Nous dirons qu'une conséquence est directe lorsque la défaillance du réseau étudié affecte directement un élément potentiellement touché. A l'inverse, lorsque la défaillance de la mission affecte un autre réseau ou un élément potentiellement touché avant un autre élément potentiellement touché, nous dirons que cette conséquence est indirecte. Nous parlerons alors d'effets domino dans ce cas. Un élément potentiellement touché peut alors être affecté à la fois par une conséquence directe et une conséquence indirecte.

La Figure 1-4 montre différents types d'effets domino.

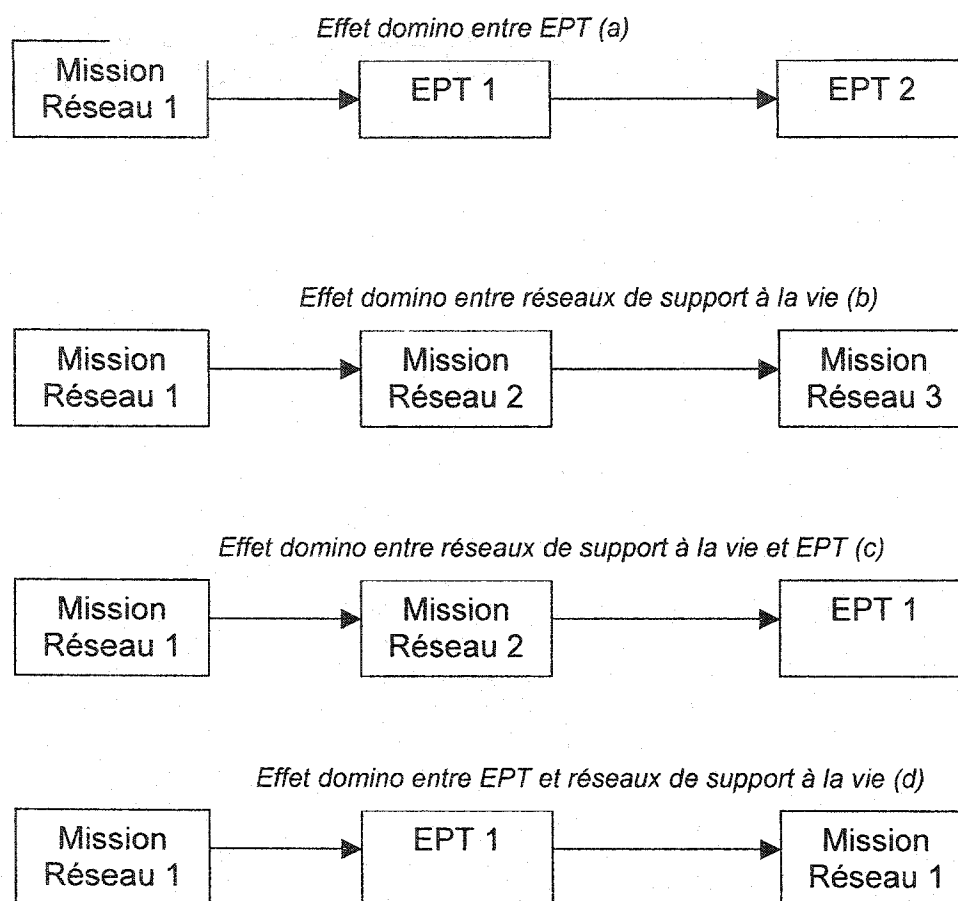


Figure 1-4 : Différents types d'effets domino

Débordement de matière

Nous distinguerons également les conséquences dues à un débordement de matière des conséquences dues à une diminution du service de la mission du réseau étudié. Dans le premier cas, la matière transportée par le réseau sort de ses conduites initiales et provoque des dommages. Dans le deuxième, une ou plusieurs missions du réseau sont diminuées.

1.8 Indicateurs de conséquences

Pour évaluer la proportion touchée d'un élément, nous pouvons utiliser des indicateurs de conséquences. Ces derniers sont des variables qui décrivent l'état de l'élément. L'état de chaque EPT pourra être caractérisé par un ou plusieurs de ces indicateurs de conséquences. Ces indicateurs sont les unités des conséquences. Le Tableau 1-3 donne quelques exemples de ces indicateurs de conséquences.

Tableau 1-3 : Indicateurs de conséquences

Indicateurs de conséquences	
I ₁	Nombre de personnes touchées
I ₂	Pertes financières (\$)
I ₃	Niveau de sécurité (faible, moyen, fort)
I ₄	Nombre d'infrastructures touchées
I ₅	Surface touchée (m ²)
I ₆	...

1.9 Facteurs aggravants

Les facteurs aggravants sont les variables qui peuvent, pour une ampleur de défaillance de mission donnée, contribuer à l'augmentation des conséquences.

Ces facteurs sont fonction des situations qui entourent la défaillance.

Concrètement, il s'agit des éléments suivants :

- La durée de la défaillance;
- L'extension géographique de la défaillance.

Ces facteurs prennent en compte les deux dimensions dans lesquelles peut évoluer une défaillance soit le temps et l'espace.

En effet, généralement l'ampleur des conséquences augmente avec la durée de défaillance, de même qu'avec l'ampleur de l'étendue géographique.

La relation entre les facteurs aggravants et l'ampleur des conséquences n'est pas forcément linéaire. Si l'on considère le cas d'une inondation par exemple, entre le début et 24 heures plus tard, les conséquences vont augmenter dramatiquement alors que si la zone reste inondée les jours suivants, les conséquences vont augmenter plus faiblement. Cependant, cette assertion est certainement vraie pour les dommages matériels mais si nous parlons de pertes financières pour une entreprise, les conséquences seront fonction du nombre de jours de travail manqués. Dans ce cas, les conséquences seront relativement linéaires par rapport au temps. Ainsi, nous voyons combien il est important de raisonner de manière systématique.

A l'aide de la Figure 1-5 nous résumons les définitions du chapitre 1. En partant de la mission d'un réseau de support à la vie, nous définissons un paramètre qui décrit le niveau de réalisation de la mission ainsi qu'une valeur

pivot de ce paramètre à partir de laquelle, les conséquences de la mission vont apparaître. Nous posons alors une nouvelle variable qui est l'ampleur de la défaillance définie comme la différence entre le paramètre et la valeur pivot. L'ampleur de la défaillance, ainsi que les facteurs aggravants vont constituer les variables d'entrée du modèle d'évaluation des conséquences. Ce modèle donnera en sortie les valeurs des indicateurs des conséquences qui décrivent l'état des éléments potentiellement touchés.

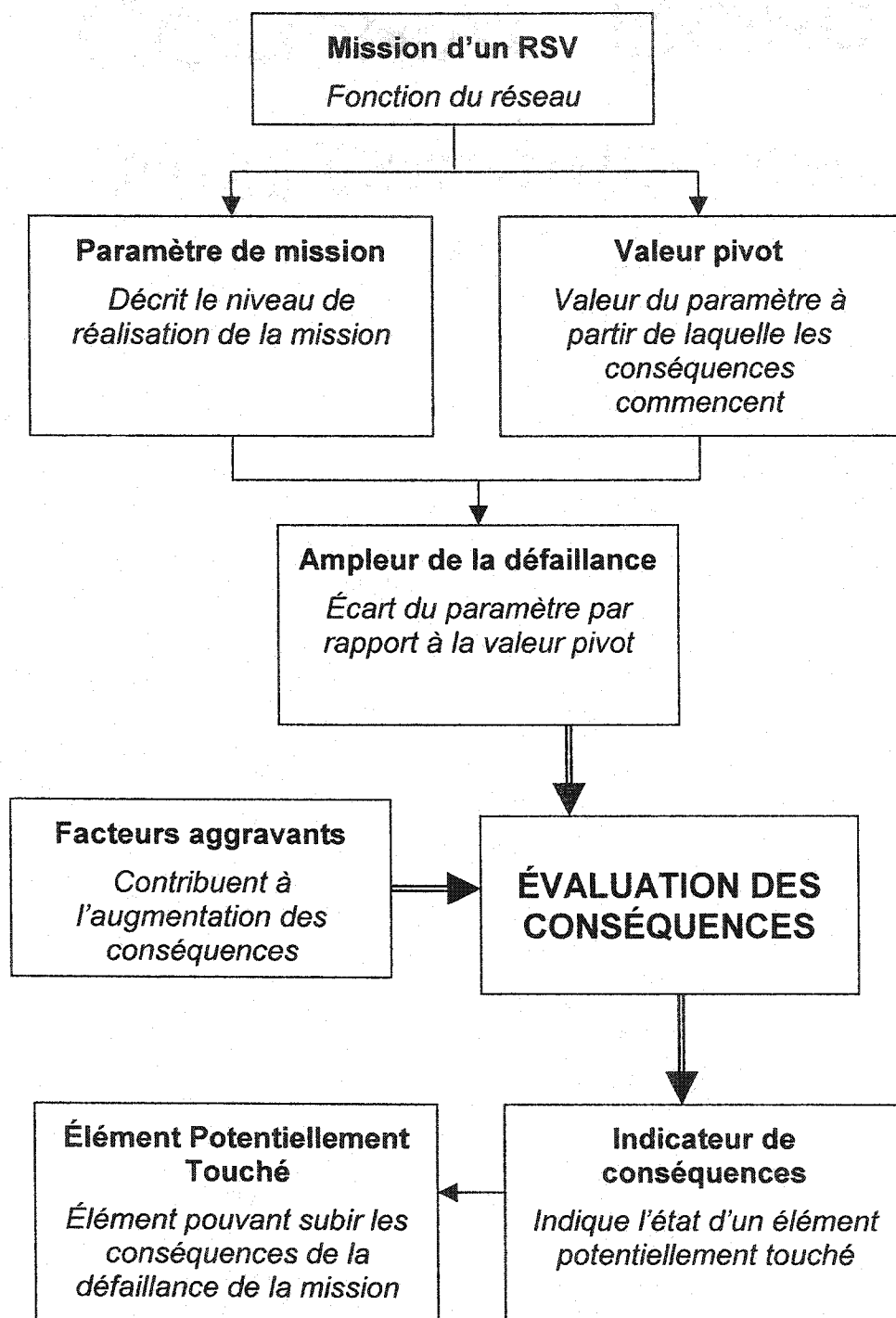


Figure 1-5 : Définition des éléments nécessaires à la méthodologie

CHAPITRE 2 : UTILISATION DE LA LOGIQUE FLOUE

2.1 La logique floue

La logique floue est une théorie qui cherche à palier aux imperfections dans les connaissances. Elle est utilisée dans les cas où notre capacité à décrire précisément un système est insuffisante. Zadeh (1965) a été un des premiers à introduire la notion de sous-ensembles flous. Aujourd'hui cette théorie est principalement utilisée en automatique et notamment dans les systèmes non linéaires. La logique floue permet de traiter des connaissances numériques avec des connaissances humaines (Bouchon-Meunier, 1993). En effet, la théorie repose sur la formalisation mathématique des connaissances humaines. Concrètement par exemple, est-ce que 15°C est une température chaude ou froide ? Cela dépend pour qui. Peut-être aussi un peu froid et un peu chaud ou plus exactement 20% froid et 80% chaud. La logique floue fournit un formalisme mathématique pour la connaissance incertaine (Godjevac, 1999). Elle permet de traiter les incertitudes sans faire appel aux probabilités.

2.2 La logique floue dans l'évaluation des conséquences

Il n'existe pas de loi mathématique ou physique reliant directement l'état d'une mission d'un réseau aux conséquences. Autrement dit, il n'existe pas de fonction mathématique reliant les indicateurs de conséquences aux différentes valeurs des variables d'entrée. Il paraît effectivement difficile de relier directement, dans le cas du réseau d'eau potable par exemple, chaque valeur de pression de l'eau à un nombre de personnes touchées. Par contre, il est possible d'associer un état du réseau à une zone de valeurs d'indicateurs de conséquences. Par exemple, il est possible de dire que si la pression dans le réseau d'eau potable est extrêmement faible, alors un grand nombre de personnes vont être touchées. Le principe fondamental de la logique floue réside dans la définition des classes "extrêmement faible" et "grand nombre de personnes".

Ces classes ne se définissent pas de manière stricte c'est-à-dire qu'une valeur de pression peut être à la fois faible et moyenne. Pour chaque valeur de pression, il faut définir son degré d'appartenance aux différentes classes. Ainsi, par exemple la pression 150 kPa peut appartenir à 30% à la classe faible et à 70% à la classe moyenne. C'est la quantification floue ou fuzzification. Une fois les variables quantifiées, il est possible d'établir des règles linguistiques entre les classes de ces variables. Ces règles de type SI...ALORS traduisent les connaissances humaines des experts. Un exemple de règle pourrait être : Si la

pression est 'Forte', ALORS la population touchée est 'Moyenne'. Enfin, l'étape de défuzzification est un calcul pondéré des conséquences pour toutes les situations de défaillance du réseau. Cette étape fournira par exemple le nombre estimé de personnes touchées en fonction de toutes les valeurs de pression.

2.3 Définition des classes et fonction d'appartenance (Quantification floue)

Soit E, l'ensemble des valeurs prises par une variable. Cet ensemble peut être découpé en sous-ensembles flous définis par leur fonction d'appartenance μ . Pour chaque sous-ensemble, nous définissons ainsi une fonction μ de E dans $[0, 1]$ qui à tout élément de E associe le degré d'appartenance à ce sous-ensemble (Gacogne, 1997). La Figure 2-1 et l'équation (1) donnent un exemple d'une fonction d'appartenance.

$$\mu(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x < a - \alpha \text{ ou } x > b + \beta \\ 1 & \text{si } a < x < b \\ 1 + (x - a)/\alpha & \text{si } a - \alpha < x < a \\ 1 + (b - x)/\beta & \text{si } b < x < b + \beta \end{cases} \quad (1)$$

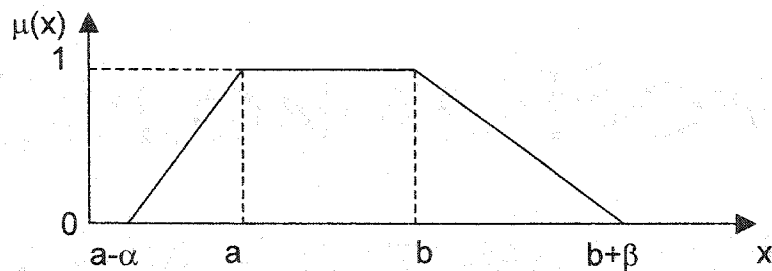


Figure 2-1 : Exemple d'une fonction d'appartenance

Dans la suite nous appellerons un sous-ensemble flou une classe.

Cette action de définir des classes est la fuzzification ou la quantification floue.

Ainsi une valeur d'une variable peut appartenir à plusieurs classes avec un taux d'appartenance différent comme le montre la Figure 2-2. Nous avons représenté deux classes (" Court " en hachuré et " Long " en grisé). Il existe des valeurs de variable qui appartiennent à une classe avec une certitude de 100 % (Taux d'appartenance égale à 1). Entre les deux (grisé et hachuré), l'appartenance aux classes n'est pas égale à 100% pour chaque classe mais la somme des fonctions d'appartenance de toutes les classes est égale à 100%. Par exemple, la valeur V_i de la variable appartient à 80% à la classe " Court " et à 20% à la classe " Long ".

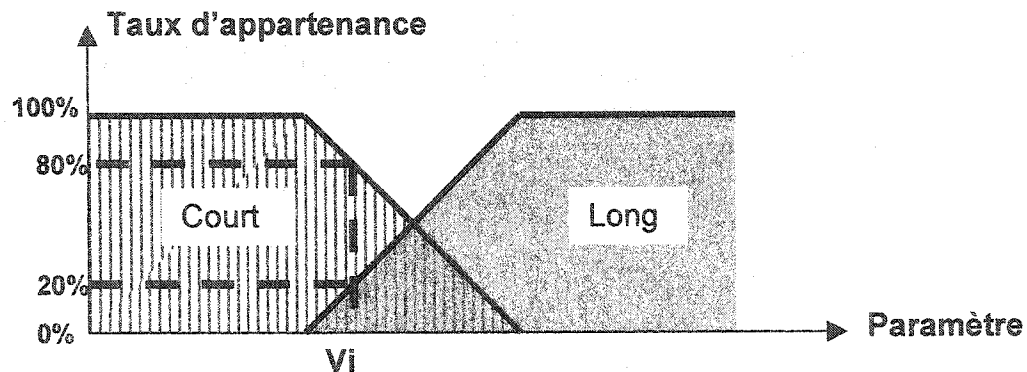


Figure 2-2 : Exemple de classes de variable

2.4 Limites entre les classes

Il est possible de définir d'autres types de limites entre les classes. Dans ce paragraphe nous définissons trois types de transition entre les classes.

Dans tous les cas, pour chaque valeur de variable, la somme des fonctions d'appartenance de toutes les classes doit être égale à 100 %.

2.4.1 Stricte

La transition est stricte lorsque le passage d'une classe à l'autre est certain, c'est-à-dire qu'une valeur donnée d'une variable est à 100% ou 0% pour toutes les classes (Figure 2-3).

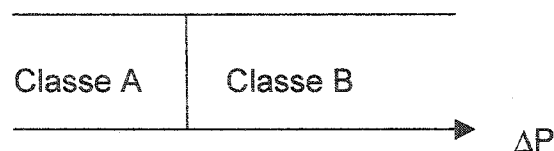


Figure 2-3 : Transition stricte entre les classes

2.4.2 Linéaire

La transition est linéaire lorsque le passage de 100 à 0 % de la fonction d'appartenance des classes se traduit par une droite (Figure 2-4).

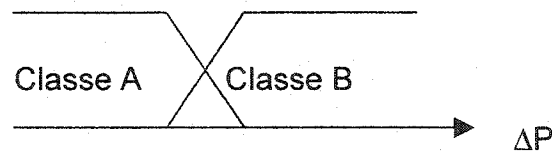


Figure 2-4 : Transition linéaire entre les classes

2.4.3 Transition courbe

Lors de la transition entre deux classes, une classe peut être prédominante sur l'autre. Dans ce cas, le passage de 100 à 0 % de la fonction d'appartenance des classes se traduit par une courbe (Figure 2-5).

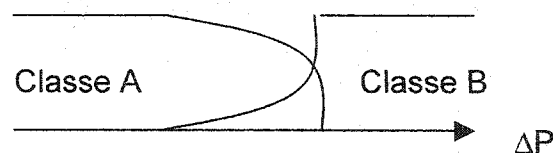


Figure 2-5 : Transition courbe entre les classes

La forme des courbes reste à déterminer (exponentielle, puissance ou autre).

Selon la nature de la variable, nous pouvons définir des formes des classes différentes à choisir parmi les formes types définies précédemment. Dans la suite, nous avons choisi d'utiliser des transitions strictes ou linéaires. Nous

n'avons pas étudié l'influence de la courbure de la transition ni leur utilisation dans un cas plutôt qu'un autre.

2.5 Règles linguistiques

Les règles établissent les relations entre les différentes classes de valeurs des nombres quantifiés. Elles donnent les classes des variables de sortie en fonction des classes des variables d'entrée. Elles sont de type SI...ALORS..., c'est-à-dire que nous donnons une condition sur les variables d'entrée pour obtenir un résultat sur les variables de sortie.

Notons VE1 et VE2, deux variables d'entrée. Par exemple, les classes définies pour VE1 et VE2 peuvent être les suivantes :

VE1 : " Faible ", " Moyen ", " Fort "

VE2 : " Court ", " Long "

Notons VS une variable de sortie. Supposons que les classes définies pour VS soient les suivantes :

" Petit ", " Moyennement petit ", " Moyennement grand ", " Grand "

Le Tableau 3-1 donne les classes de VS en fonction des classes de VE1 et VE2. Il se lit de la manière suivante : **SI** VE1 est " Moyen " et **SI** VE2 est " Court ", **ALORS** VS est " Moyennement petit ".

Tableau 2-1 : Exemple de règles linguistiques

		VE1		
		Faible	Moyen	Fort
VE2	Court	Petit	Moyennement petit	Grand
	Long	Moyennement petit	Moyennement grand	Grand

Plus formellement, notons les classes des variables d'entrée ($A_1, A_2, \dots, A_n$) et ($B_1, B_2, \dots, B_m$), avec n et m respectivement le nombre de classes de VE1 et VE2 et notons les classes de sorties ($C_1, C_2, \dots, C_p$), avec p le nombre de classes de la variable de sortie VS.

Nous noterons $R(A_i, B_j)$ le résultat de la règle combinant les classes de variables d'entrée A_i et B_j avec i appartient à $[1, n]$ et j appartient à $[1, m]$.

Il existe donc k appartenant à $[1, p]$ tel que $R(A_i, B_j) = C_k$.

Le tableau pourra alors se lire de la manière suivante :

Si VE1 appartient à A_i et si VE2 appartient à B_j alors VS appartient à C_k .

Dans le Tableau 3-1, nous avons par exemple $R(\text{" Fort "}, \text{" Long "}) = \text{" Grand "}$.

Il peut exister plusieurs couples (i, j) tel que $C_k = R(A_i, B_j)$. Par exemple, dans le Tableau 3-1 cela est le cas pour $R(\text{" Fort "}, \text{" Court "}) = R(\text{" Fort "}, \text{" Long "}) = \text{" Grand "}$

2.6 Défuzzification

La défuzzification ou déflousification (Gacôgne, 1997) va permettre de relier les variables de sortie aux variables d'entrée. Le résultat de cette étape donne les valeurs de la variable de sortie en fonction de toutes les valeurs des variables d'entrée. Il existe plusieurs méthodes de défuzzification (Gabriel, 2001). La méthode qui nous semble la plus adaptée aux études de conséquences est la méthode de la somme pondérée. Nous en donnons une description.

Nous allons raisonner dans le cas où il y a deux variables d'entrée. Le cas général s'en déduira facilement.

Notons E_1 , E_2 et S les ensembles décrits par les variables VE_1 , VE_2 et VS .

De manière formalisée, la défuzzification peut être vue comme une application F de $E_1 \times E_2$ dans S qui à tout couple (VE_1, VE_2) associe une valeur $VS = F(VE_1, VE_2)$.

Nous notons alors x_i , y_j et z_k les taux d'appartenance respectivement de VE_1 , VE_2 et VS aux classes A_i , B_j et C_k avec i appartient à $[1, n]$, j appartient à $[1, m]$ et k appartient à $[1, p]$.

VE_1 appartient aux classes $(A_1, A_2, \dots, A_n)$ avec les taux d'appartenance $(x_1, x_2, \dots, x_n)$.

De même VE_2 appartient aux classes $(B_1, B_2, \dots, B_m)$ avec les taux d'appartenance $(y_1, y_2, \dots, y_m)$.

Nous allons utiliser la règle probabiliste (Bouchon-Meunier, 1993) pour calculer le taux d'appartenance z_k de VS à C_k :

Avec les notations précédentes :

VS appartient à la classe C_k avec un taux d'appartenance de

$$z_k = \sum_{(i,j) \in N_k} x_i y_j$$

où N_k est l'ensemble des couples (i, j) tels que $C_k = R(A_i, B_j)$.

En effet, de cette manière la somme des taux d'appartenance z_k de VS est égale à 100%, ce qui est physiquement réaliste pour notre problématique d'étude des conséquences.

Preuve :

$$\sum_k z_k = \sum_k \sum_{(i,j) \in N_k} x_i y_j = \sum_{(i,j)} x_i y_j = \left(\sum_i x_i \right) \times \left(\sum_j y_j \right) = (1) \times (1) = 1$$

D'autres règles existent (Gacogne 1997). Mentionnons simplement la règle de Zadeh qui prend le $\min(x_i, y_j)$ pour le calcul de la valeur de z_k .

Notons alors T_k les trapèzes formés par les trapèzes représentant les classes C_k des variables de sorties tronqués à la valeur z_k du taux d'appartenance (en grisé sur la Figure 2-6).

L'annexe I fournit une méthode pour calculer le centre de gravité d'un trapèze tronqué.

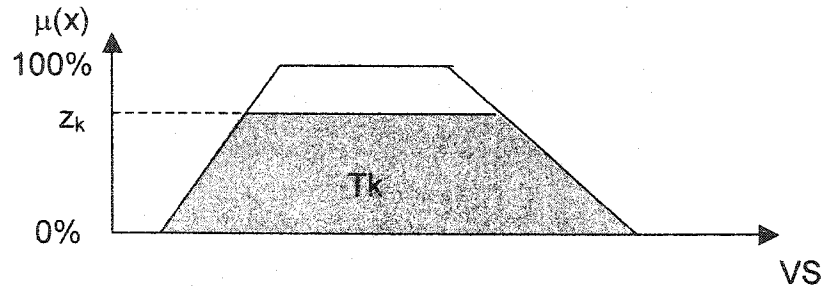


Figure 2-6 : Trapèze tronqué

La méthode de la somme pondérée (Gabriel, 2001) donne la valeur VS de la variable de sortie correspondante.

Notons g_k et S_k respectivement l'abscisse du centre de gravité et la surface des trapèzes T_k avec k appartient à $[1, p]$

VS est donné par :

$$VS = \frac{\sum_k g_k S_k}{\sum_k S_k}$$

Il existe également d'autres méthodes (Gabriel, 2001).

La méthode du maximum prend le maximum de la fonction d'appartenance de la variable de sortie résultante (trapèzes tronqués). Dans ce cas, des ambiguïtés peuvent apparaître du fait que plusieurs abscisses peuvent correspondre à ce maximum.

La méthode des maxima prend la moyenne des abscisses qui correspondent au maximum.

La méthode du centroïde prend le centre de gravité de la surface de la fonction d'appartenance de la variable de sortie résultante. Cette méthode est lourde en calculs car la fonction d'appartenance résultante peut avoir une forme complexe. Cependant, elle présente l'avantage d'enlever les discontinuités de la variable de sortie.

CHAPITRE 3 : MÉTHODOLOGIE PROPOSÉE

Dans une étude de conséquences, les effets induits par les conditions initiales ne sont pas définis avec certitude. C'est précisément cette incertitude que nous pourrions formaliser en utilisant la logique floue. Dans ce chapitre, après avoir défini comment nous pouvons appliquer les principes de la logique floue à la problématique de l'étude des conséquences, nous expliciterons les différentes étapes de la méthodologie proposée. Chaque étape sera illustrée par un exemple sur le réseau d'eau potable.

3.1 Application de la logique floue

3.1.1 Variables d'entrée et de sortie

Les variables d'entrée et de sorties pour l'évaluation des conséquences sont les suivantes :

Entrées :

- l'ampleur de la défaillance d'une mission ;
- la durée de la défaillance ;
- l'extension géographique de la défaillance.

Sorties :

- indicateurs de conséquences.

Les entrées sont des variables continues, il y a donc une infinité de valeurs que peuvent prendre ces variables donc une infinité de combinaisons de cas possibles. Le principe est donc de discréter ces variables en classes pour réduire le problème à un nombre fini de combinaisons.

Pour les variables de sortie, à savoir les indicateurs de conséquences, nous proposons également de les discrétiser en classes. De cette manière, les experts pourront attribuer à chaque combinaison des classes des variables d'entrée, une classe de variable de sortie.

3.1.2 Définition des classes ou quantification floue

Le gestionnaire du réseau peut définir des classes de valeurs de la variable en fonction des effets qui sont connus à priori. Pour déterminer ces classes de variables, nous proposons la méthode suivante.

A. Définition des valeurs seuils

Il faut déterminer les valeurs seuils pour lesquelles des effets sont connus. Ces valeurs seuils peuvent être définies en fonction des critères de conception. Elles peuvent être définies de manière stricte lorsque l'effet commence de manière certaine au-delà de la valeur seuil. Elles peuvent également être

définies de manière floue, c'est-à-dire lorsque nous ne pouvons pas savoir à partir de quelle valeur commence l'effet. Cette dernière situation est la plus fréquente. Dans ce cas nous donnons un intervalle de valeurs de la variable à l'intérieur duquel commence l'effet. Au sein de cet intervalle, la certitude sur l'effet passera de 0 à 100%. Lorsque nous ne connaissons pas les différents effets ou qu'il n'est pas possible de déterminer des valeurs seuils, les classes pourront être définies de manière empirique ainsi que leur transition. En particulier pour les facteurs aggravants qui n'ont pas d'effet en tant que tel. Par contre leur quantification floue peut être interprétée physiquement par l'incertitude de leur influence sur les conséquences. Elle va permettre d'avoir une représentation continue des conséquences plutôt que seulement pour des valeurs prédéfinies. Si l'on considère le facteur aggravant 'durée de la défaillance' par exemple, la quantification floue de ce paramètre permettra d'obtenir un résultat en terme de conséquences pour toutes les durées et non pour quelques durées choisies comme dans une approche par scénarios.

B. Représentation des classes de la variable

Une fois ces valeurs seuils définies, nous pouvons alors représenter les classes de valeurs de la variable en traçant leur fonction d'appartenance qui représente physiquement la certitude d'apparition d'un effet. La fonction d'appartenance à une classe est une fonction de l'ensemble des valeurs de la variable dans $[0, 1]$

qui associe à chaque valeur de la variable son taux d'appartenance à cette classe.

C. Représentation des classes d'ampleur de défaillance

Lorsque la variable est le paramètre de la mission, nous devons la transformer en 'ampleur de la défaillance' en faisant une translation par rapport à la valeur pivot.

Par définition, l'ampleur de la défaillance est calculée de la manière suivante :

$$\text{Ampleur de la défaillance} = |P - P_0|$$

avec :

P, la valeur du paramètre de la mission

P₀, la valeur pivot du paramètre de la mission

3.1.3 Définition des règles

Les règles devront être définies en accord avec le gestionnaire du réseau par des experts des différents domaines. Ces règles linguistiques établissent des relations entre les classes des variables d'entrée (ampleur de la défaillance et facteurs aggravants) et les classes de variables de sortie (indicateurs de conséquences).

3.1.4 Défuzzification

La défuzzification est l'aboutissement de la technique de la logique floue car elle présente les résultats. Ces résultats diffèrent selon la méthode de défuzzification employée. Les techniques qui nous semblent adaptées à la problématique de l'évaluation des conséquences sont la règle probabiliste et la méthode de la somme pondérée.

La règle probabiliste fait correspondre un taux d'appartenance de la variable de sortie proportionnelle aux taux d'appartenance des variables d'entrée. Comme explicité au paragraphe 2.6, le taux d'appartenance aux classes des variables de sortie est égal au produit des taux d'appartenance aux classes des variables d'entrée correspondantes.

Cette règle nous paraît adaptée car elle a une interprétation physique. En effet, cette règle a les propriétés suivantes :

Commutativité : l'ordre des variables d'entrée n'a pas d'importance.

Monotonie : plus l'appartenance aux classes des variables d'entrée est importante, plus celle aux classes de sortie est importante.

Conservation de l'appartenance : la somme des taux d'appartenance de toutes les classes pour la variable de sortie est égale à 100%.

La méthode de la somme pondérée décrite au paragraphe 2.6 et que nous allons utiliser présente l'avantage d'enlever toute discontinuité tout en

simplifiant les calculs par rapport à la méthode du centroïde. La continuité du résultat nous semble importante étant donné qu'il est logique que toutes les valeurs de l'indicateur de conséquences puissent être prises.

3.2 Méthodologie

Nous proposons une méthodologie en 8 étapes, décrite dans les paragraphes suivants et résumée à la Figure 3-11.

3.2.1 Étape 1 : définition de la mission, du paramètre et de la valeur pivot

La première étape consiste à définir la mission et lui associer un paramètre principal ainsi que son unité. Avec ce paramètre, il faut définir une valeur pivot au-delà de laquelle les conséquences apparaissent.

Exemple :

Une des missions du réseau d'eau potable est de fournir une pression donnée. En dessous de 500 kPa (Dupont, 1965), des conséquences commencent à apparaître à cause de l'alimentation difficile des immeubles de fortes hauteurs. Dans cet exemple le paramètre est la pression en kPa et 500 kPa est la valeur pivot du paramètre.

Mission : fournir une pression suffisante pour les utilisateurs

Paramètre : pression de l'eau en kPa

Valeur pivot : 500 kPa

3.2.2 Étape 2 : définition des classes d'ampleur de défaillance

Il faut ensuite définir des classes de valeurs pour ces paramètres de missions.

Exemple :

A. Définition des valeurs seuils

Dans l'exemple sur la pression du réseau d'eau potable :

- a) La pression est insuffisante pour alimenter les conduites en dessous de "entre 40 et 50 kPa" (Labonté et Patry, 1987).
- b) La pression est insuffisante pour assurer une qualité suffisante pour sa potabilité en dessous de "entre 150 et 200 kPa" (Ministère de l'environnement du Québec, 2002).
- c) La pression est insuffisante pour alimenter les immeubles de 4 étages et plus en dessous de 300 kPa (Dupont, 1965).
- d) La pression est insuffisante pour alimenter les immeubles de 10 étages et plus en dessous de 500 kPa (Dupont, 1965).

B. Représentation des classes de la variable

Nous définissons ensuite des classes de paramètre. Chaque classe correspond à une zone de valeurs du paramètre pour lesquelles certains effets définis

précédemment s'appliquent de manière inclusive. Nous pouvons déterminer quatre classes en utilisant les valeurs seuils présentées au paragraphe précédent comme limites entre ces classes.

Classe 1. La pression dans les conduites est insuffisante et les effets a) à d) sont inclus. De 0 à 40 kPa, la valeur du paramètre appartient à 100 % à la classe 1; entre 40 et 50 kPa, l'appartenance à la classe passe progressivement de 100 à 0 %.

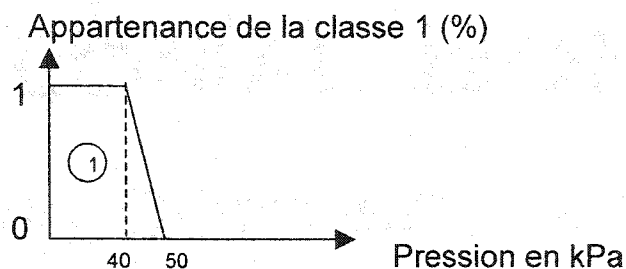


Figure 3-1 : Représentation de la classe 1

Classe 2. Si le paramètre appartient à la classe 2, les effets b) à d) sont inclus. De 50 à 150 kPa, la valeur du paramètre appartient à 100 % à la classe 2; entre 40 et 50 kPa, l'appartenance à la classe passe progressivement de 0 à 100 % ; entre 150 et 200 kPa, l'appartenance à la classe passe progressivement de 100 à 0 %.

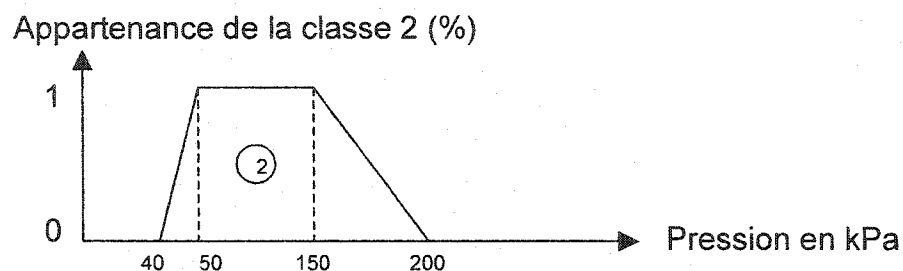


Figure 3-2 : Représentation de la classe 2

Classe 3. Si le paramètre est dans la classe 3, les effets c) et d) sont inclus. De 200 à 300 kPa, la valeur du paramètre appartient à 100 % à la classe 3; entre 150 et 200 kPa, l'appartenance à la classe passe progressivement de 0 à 100 %"

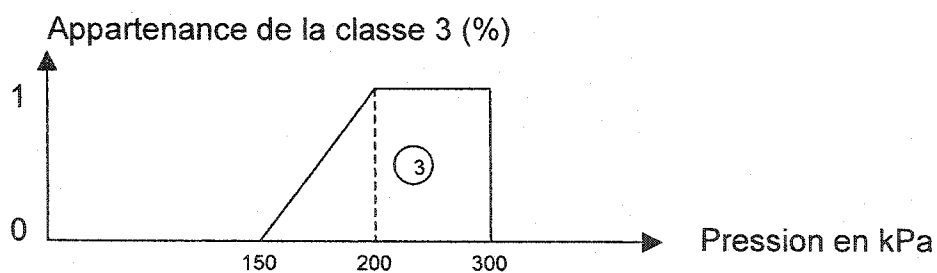


Figure 3-3 : Représentation de la classe 3

Classe 4. Enfin si le paramètre est dans la classe 4, seul à l'effet d) est inclus.

De 300 à 500 kPa, la valeur du paramètre appartient à 100 % à la classe 4.

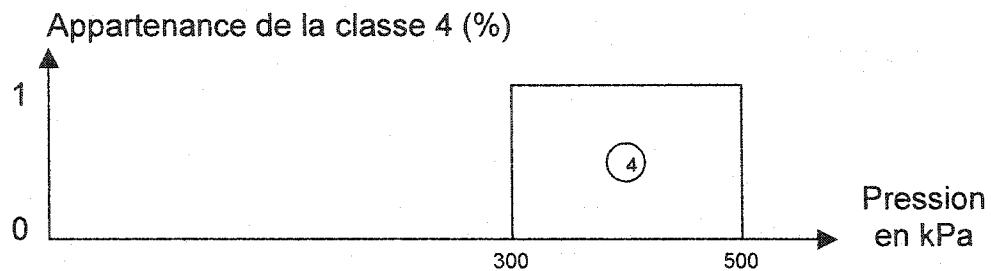


Figure 3-4 : Représentation de la classe 4

Nous avons choisi de définir des classes de forme trapézoïdale (classes 1,2 et 3) ou rectangulaire (classe 4). Il est possible de définir d'autres formes pour constituer les limites entre les classes.

C. Représentation des classes d'ampleur de défaillance

Dans notre exemple, nous pouvons alors nommer quatre classes d'ampleur de défaillance qui correspondent aux quatre classes de paramètres à une translation de la valeur pivot près :

- Très faible : de 0 à 200 kPa, l'ampleur de la défaillance appartient à 100 % à la classe Très faible

- Faible : de 200 à 300 kPa, l'ampleur de la défaillance appartient à 100 % à la classe Faible ; entre 300 et 350 kPa, l'appartenance à la classe Faible de l'ampleur de la défaillance passe progressivement de 100 à 0 %
- Forte : entre 300 et 350 kPa, l'appartenance à la classe Forte de l'ampleur de la défaillance passe progressivement de 0 à 100 % ; de 350 à 450 kPa, l'ampleur de la défaillance appartient à 100 % à la classe Forte ; entre 450 et 460 kPa, l'appartenance à la classe Forte de l'ampleur de la défaillance passe progressivement de 100 à 0 %
- Très forte : entre 450 et 460 kPa, l'appartenance à la classe Très forte de l'ampleur de la défaillance passe progressivement de 0 à 100 % ; de 460 à 500 kPa, l'ampleur de la défaillance appartient à 100 % à la classe Très forte

Une représentation de ces classes est donnée à la Figure 3-5:

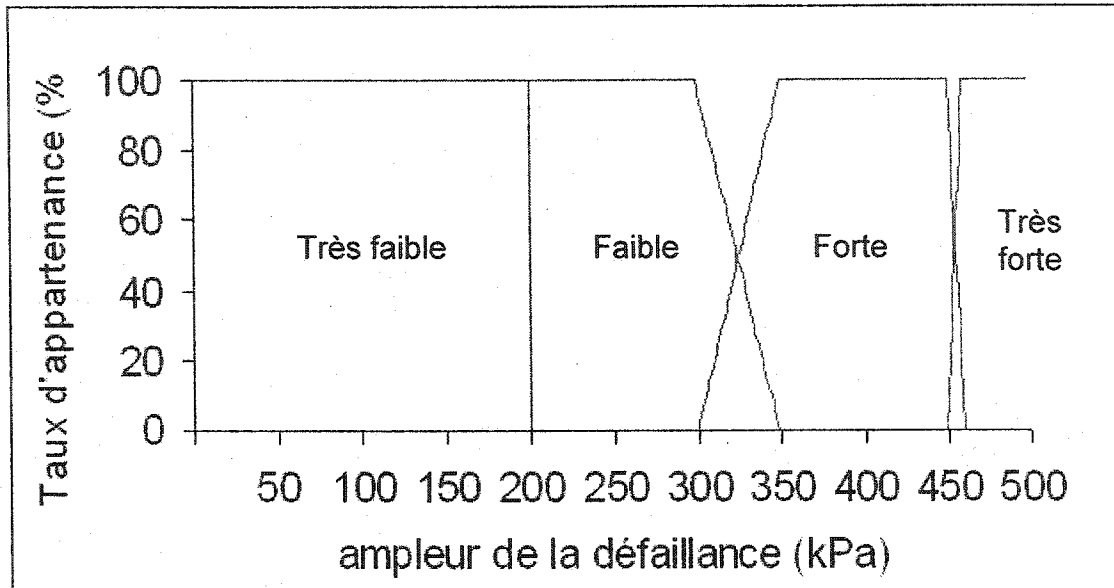


Figure 3-5 : Quantification floue de l'ampleur de la défaillance

3.2.3 Étape 3 : définition des éléments potentiellement touchés et de leurs indicateurs

Cette troisième étape consiste à définir les Éléments Potentiellement Touchés (EPT) sous forme de liste ou de matrice. Ces éléments pourront être sélectionnés dans le Tableau 1-1. Toutefois les éléments de ce tableau peuvent être détaillés selon les besoins du destinataire de l'étude. A chacun de ces éléments il faut associer un indicateur de conséquences.

Exemple :

Dans l'exemple du réseau d'eau potable, nous pouvons choisir de nous intéresser à l'EPT "Population" et nous pouvons utiliser l'indicateur de conséquences "nombre de personnes touchées".

3.2.4 Étape 4 : définition des classes d'indicateurs

Cette étape consiste à définir des classes de valeur pour les indicateurs de conséquences (quantification floue).

Exemple :

Toujours dans notre exemple sur le réseau d'eau potable, nous considérons que la zone étudiée compte une population totale de 10 000 habitants. L'élément potentiellement touché étudié est la population. L'indicateur est le nombre de personnes touchées.

A. Définition des valeurs seuils

Nous pouvons définir les classes suivantes de nombre de personnes touchées.

Ici, ces classes sont définies de manière arbitraire.

Très faible : N1 : 0.1% de la population totale = 10

Faible : N2 : 5% de la population totale = 500

N3 : 10% de la population totale = 1 000

Moyen : N4 : 15% de la population totale = 1 500

N5 : 50% de la population totale = 5 000

Fort : N6 : 70% de la population totale = 7 000

B. Représentation des classes de la variable

La Figure 3-6 représente ces classes.

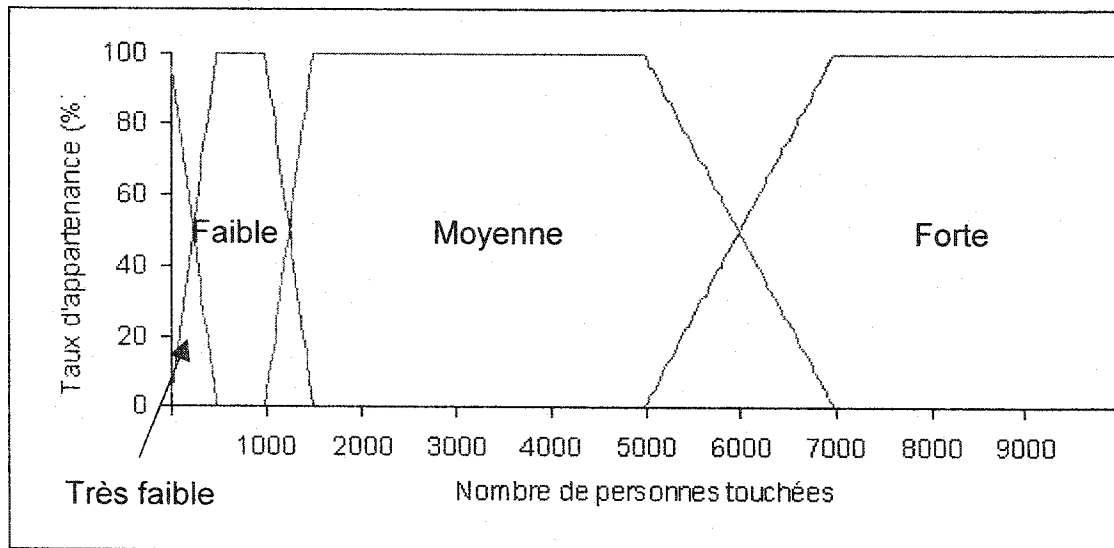


Figure 3-6 : Quantification floue du nombre de personnes touchées

3.2.5 Étape 5 : étude de l'influence des facteurs aggravants

Il faut ensuite intégrer les facteurs aggravants. Pour cela, il faut déterminer leur influence sur la défaillance et, au besoin, définir des classes de valeur pour ces variables.

Durée :

L'influence de la durée de la défaillance sur l'ampleur des conséquences n'est pas forcément linéaire. Si la relation est linéaire, nous devons déterminer le facteur multiplicateur. Par exemple, lorsque la perte financière journalière est connue, la perte financière totale est égale au nombre de jours de défaillance multiplié par la perte financière journalière. Souvent cette relation n'est pas linéaire car d'autres facteurs implicites entrent en jeu. Par exemple, si nous considérons une défaillance sur un réseau de transport en commun, les conséquences vont être moins importantes la première journée que les suivantes car certains usagers ont les moyens de trouver des solutions de rechange pour une journée (travail à domicile, congés). Dans ce cas, il est nécessaire de considérer la variable 'durée de la défaillance'. Il faut alors quantifier cette variable de manière floue et définir différentes classes de durée. La durée d'un événement peut à la fois être courte ou moyenne par exemple. Concrètement cela peut s'interpréter comme l'incertitude due à la subjectivité des experts. La limite entre les différentes classes de durée pourra être établie de manière empirique s'il n'y a pas de critères pour définir des valeurs seuils car l'important est de formaliser la continuité lorsque la durée de défaillance varie.

Extension géographique :

Selon la zone géographique touchée, l'ampleur des conséquences peut être différente. Il peut donc être intéressant de découper la zone étudiée en différentes zones géographiques pour raffiner l'évaluation des conséquences.

Exemple :

Nous n'étudierons pas l'influence de la durée et de l'extension géographique pour que ce cas d'exemple reste simple.

3.2.6 Étape 6 : définition des règles linguistiques

Les règles établissent les relations entre les différentes classes de valeurs des variables quantifiées. Elles établissent une relation entre (1) l'ampleur de la défaillance et les facteurs aggravants de la mission et (2) les indicateurs de conséquences. Ces règles sont de type SI...ALORS. Elles sont définies par les gestionnaires du réseau ou par des experts des différents domaines impliqués.

Exemple :

Dans notre exemple sur l'eau potable, les règles pourront être définies par un groupement de personnes composé d'un représentant du réseau d'eau potable, d'un hydraulicien et d'un expert en gestion de crises.

Exemple :

Dans notre exemple sur le réseau d'eau potable, nous avons pris en compte les variables suivantes dans le modèle :

Entrée :

- VE = ampleur de la défaillance

Sortie :

- VS = Nombre de personnes touchées

Le Tableau 3-1, donne un exemple d'ensemble de règles, il se lit de la manière suivante : SI l'ampleur de la défaillance est 'Très faible', ALORS le nombre de personnes touchées est 'Très faible'.

Tableau 3-1 : Règles linguistiques entre les paramètres

SI	Ampleur de la défaillance	Très faible	Faible	Forte	Très forte
ALORS	Nombre de personnes touchées	Très Faible	Faible	Moyen	Fort
Justification		Le nombre de personnes habitant dans des immeubles de 10 étages ou plus est très faible	Le nombre de personnes habitant dans des immeubles de 10 étages ou plus est faible	Toute la population est touchée par la diminution de la qualité de l'eau	Tout le réseau est touché

3.2.7 Étape 7 : défuzzification

Cette étape consiste à mettre en œuvre les calculs de défuzzification. Dans cette étape, nous calculons les valeurs des indicateurs de conséquences pour chaque valeur de l'ampleur de la défaillance et des facteurs aggravants.

Exemple :

Nous allons faire le calcul pour une ampleur de défaillance donnée de 320 kPa. Nous avons ensuite utilisé le logiciel Excel pour réaliser les calculs pour toutes les autres ampleurs de défaillance de 0 à 500 kPa.

Nous utilisons la méthodologie décrite au paragraphe 2.6.

La Figure 3-7 donne les valeurs d'appartenance aux classes d'ampleur de défaillance pour la valeur 320 kPa.

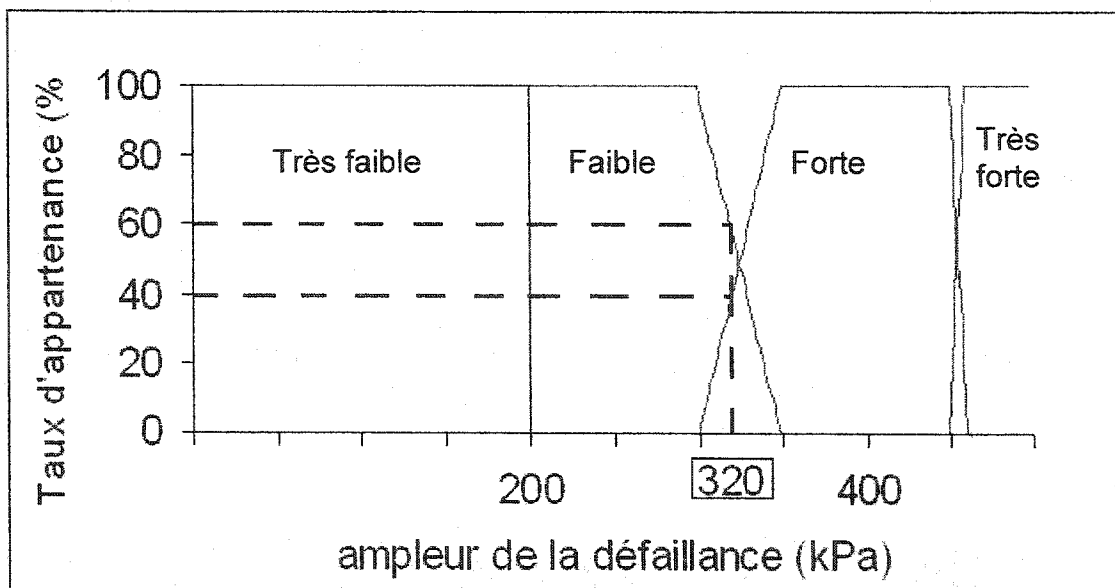


Figure 3-7 : Interprétation de la quantification floue

Pour une ampleur de défaillance de 320 kPa, nous sommes à 60% dans la classe Faible et à 40% dans la classe Forte.

Le Tableau 3-2 résume les classes et les taux d'appartenance pour le cas où $VE = 320$ kPa.

Tableau 3-2 : Valeurs des taux d'appartenance

VE	Très faible	Faible	Forte	Très forte
	0%	60%	40%	0%
VS	Très Faible	Faible	Moyen	Fort
	0%	60%	40%	0%

En appliquant les règles du Tableau 3-1, et en utilisant la règle probabiliste décrite au paragraphe 2.6, nous obtenons un nombre de personnes touchées qui est Faible à 60% et Fort à 40%.

Nous considérons alors les trapèzes de chaque classe d'indicateur tronqués au degré de certitude correspondant. Par exemple, le résultat des règles nous a donné un nombre de personnes touchées "Faible" à 60% pour la valeur 320 kPa de l'ampleur de la défaillance. Le trapèze tronqué correspondant est illustré en grisé à la Figure 3-8

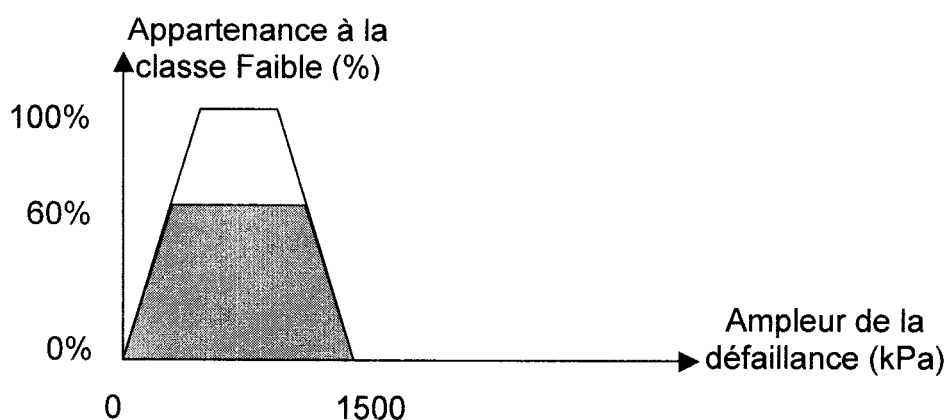


Figure 3-8 : Troncature du trapèze de la classe Faible

Il faut ensuite calculer l'abscisse ainsi que l'aire du centre de gravité du trapèze tronqué. Pour cela, nous avons utilisé la méthode décrite à l'annexe I.

Le tableau I-1 de l'annexe I donne les résultats de ces calculs pour l'ampleur de défaillance de 320 kPa. Nous obtenons $X_1 = 750$ personnes touchées pour l'abscisse du centre de gravité de la classe 'Faible' et $X_2 = 3\,854$ personnes touchées pour la classe 'Moyenne'.

La Figure 3-9 illustre ces résultats.

Pour obtenir la valeur moyenne du nombre de personnes touchées correspondante, nous utilisons la méthode de la somme pondérée des centres de gravité. Cette technique utilise la moyenne des abscisses X_1 et X_2 des centres de gravité des trapèzes pondérées par leur surface S_1 et S_2 (Figure 3-9).

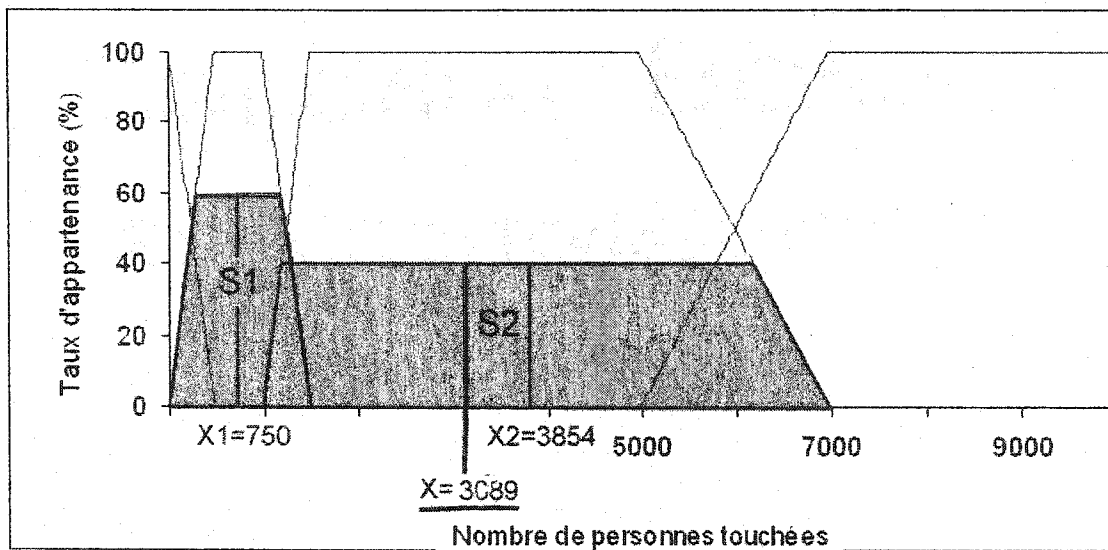


Figure 3-9 : Nombre de personnes touchées pour une ampleur de défaillance 320 kPa

La valeur moyenne du nombre de personnes touchées correspondante est donnée par la formule suivante :

$$X = \frac{X_1.S_1 + X_2.S_2}{S_1 + S_2}$$

Pour la valeur 320 kPa de l'ampleur de la défaillance, nous avons obtenu une valeur moyenne du nombre de personnes touchées de 3 089.

Avec le logiciel Excel, nous pouvons automatiser ce calcul pour chaque valeur d'ampleur de défaillance.

3.2.8 Étape 8 : représentation des résultats

Enfin, nous pouvons représenter les résultats sous forme de courbes, d'abaques ou de tableaux selon les besoins des gestionnaires de réseaux. Nous sommes en mesure de fournir une valeur des indicateurs de conséquences pour toutes les valeurs des variables d'entrée : ampleur de la défaillance, durée et extension géographique. En ce sens, l'évaluation des conséquences n'est pas tributaire de scénarios particuliers.

Nous proposons une liste de représentations possibles des résultats :

- Courbes 2D Indicateurs de conséquences = $f(\text{ampleur de la défaillance})$ pour une durée et une extension géographique fixées.
- Courbes 3D Indicateurs de conséquences = $f(\text{ampleur de la défaillance, extension géographique})$ pour une durée fixée.
- Courbes 3D Indicateurs de conséquences = $f(\text{ampleur de la défaillance, durée})$ pour une extension géographique fixée.
- Tableaux des valeurs des indicateurs de conséquences en fonction des paramètres d'entrée.

Le choix de la représentation restera aux gestionnaires des réseaux.

Exemple :

Pour notre exemple sur le réseau d'eau potable, la Figure 3-10 donne le nombre moyen de personnes touchées pour toutes les ampleurs de défaillance possibles.

Le résultat essentiel n'est pas tant la courbe elle-même que son allure. En effet, nous pouvons en déduire que 200, 300 et 450 kPa sont des points critiques et qu'il faut concentrer les moyens autour de ces points critiques dans les mesures d'atténuation. Il est intéressant de noter que l'allure des courbes n'est pas la même autour de ces trois points critiques. En effet, le passage autour de 200 kPa est brusque alors que celui autour de 300 kPa est exponentiel et celui autour de 450 kPa est linéaire. Les moyens d'intervention seront peut être différents selon ces types de transition.

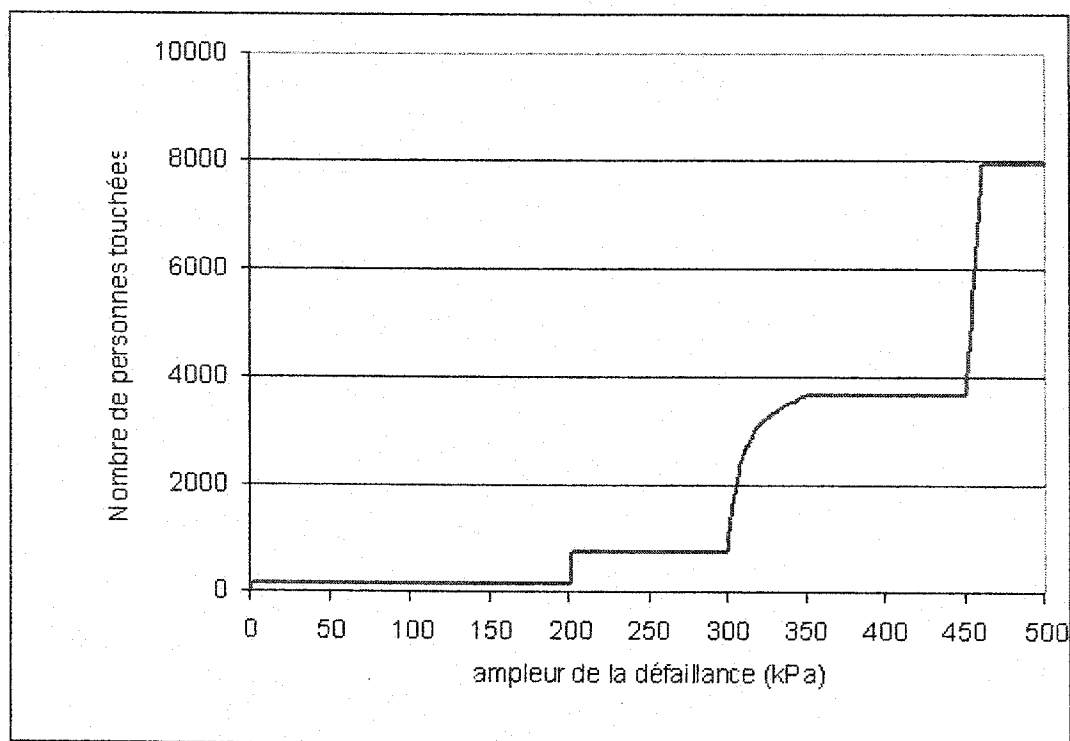


Figure 3-10 : Nombre de personnes touchées en fonction de l'ampleur de la défaillance

Nous avons ainsi établi une corrélation entre la valeur de l'ampleur de la défaillance de la mission et la valeur d'un indicateur de l'état d'un élément. Ainsi pour toutes les valeurs de l'ampleur de la défaillance de la mission, nous avons une valeur de l'indicateur d'un élément donné.

De ce type de courbes nous pouvons déduire, non seulement les conséquences maximales mais également les conséquences associées à des niveaux de défaillance de mission plus faibles.

Nous pouvons formuler deux remarques techniques sur les limitations de la courbe obtenue.

Premièrement la dernière classe d'ampleur de défaillance doit être impérativement bornée pour qu'il soit possible de calculer son aire. Cette limite peut être fixée par des considérations techniques comme la valeur de la pression à la rupture d'une conduite par exemple. Par contre, il y a une problématique spécifique avec des valeurs d'ampleur de défaillance qui peuvent être physiquement illimitées comme c'est le cas pour le taux de coliformes dans l'eau par exemple. Dans ce dernier cas, il faut définir un seuil maximal au-delà duquel un accroissement de la valeur n'a plus de signification. La limite inférieure de cette classe doit être stricte. Cette classe extrême amène la problématique d'une aire prépondérante qui induit un biais sur les résultats. Des études de sensibilité doivent être réalisées à ce sujet. Il serait par exemple envisageable de modifier la méthode numérique de la moyenne pondérée ou de prévoir des règles sur les proportions des longueurs des classes.

Deuxièmement, la courbe montre un minimum de conséquences de 165 personnes touchées. Or dans la réalité, les conséquences devraient commencer à 0. Les conséquences minimales sont obtenues pour toutes les valeurs des variables d'entrée qui donnent une appartenance de 100% à la classe d'indicateur de conséquence "Très faible". Cette valeur de sortie est en fait imposée dans le calcul par la valeur de l'abscisse du centre de gravité de la

première classe d'indicateur de conséquences. Il est physiquement possible que les conséquences puissent ne pas être continues et prennent un nombre fini de valeurs. Cela est le cas par exemple si l'indicateur de conséquence est le nombre de casernes de pompier touchées. Cela vient du fait que le nombre de valeurs que peut prendre cet indicateur est beaucoup plus limité. Mentionnons qu'en ce qui concerne la continuité des conséquences, il faudra distinguer une discontinuité physique d'une discontinuité obtenue par le calcul. Des méthodes devront être développées pour prendre en compte ce biais méthodologique. Une normalisation des aires pourrait être une solution.

La Figure 3-11 résume les différentes étapes de la méthodologie.

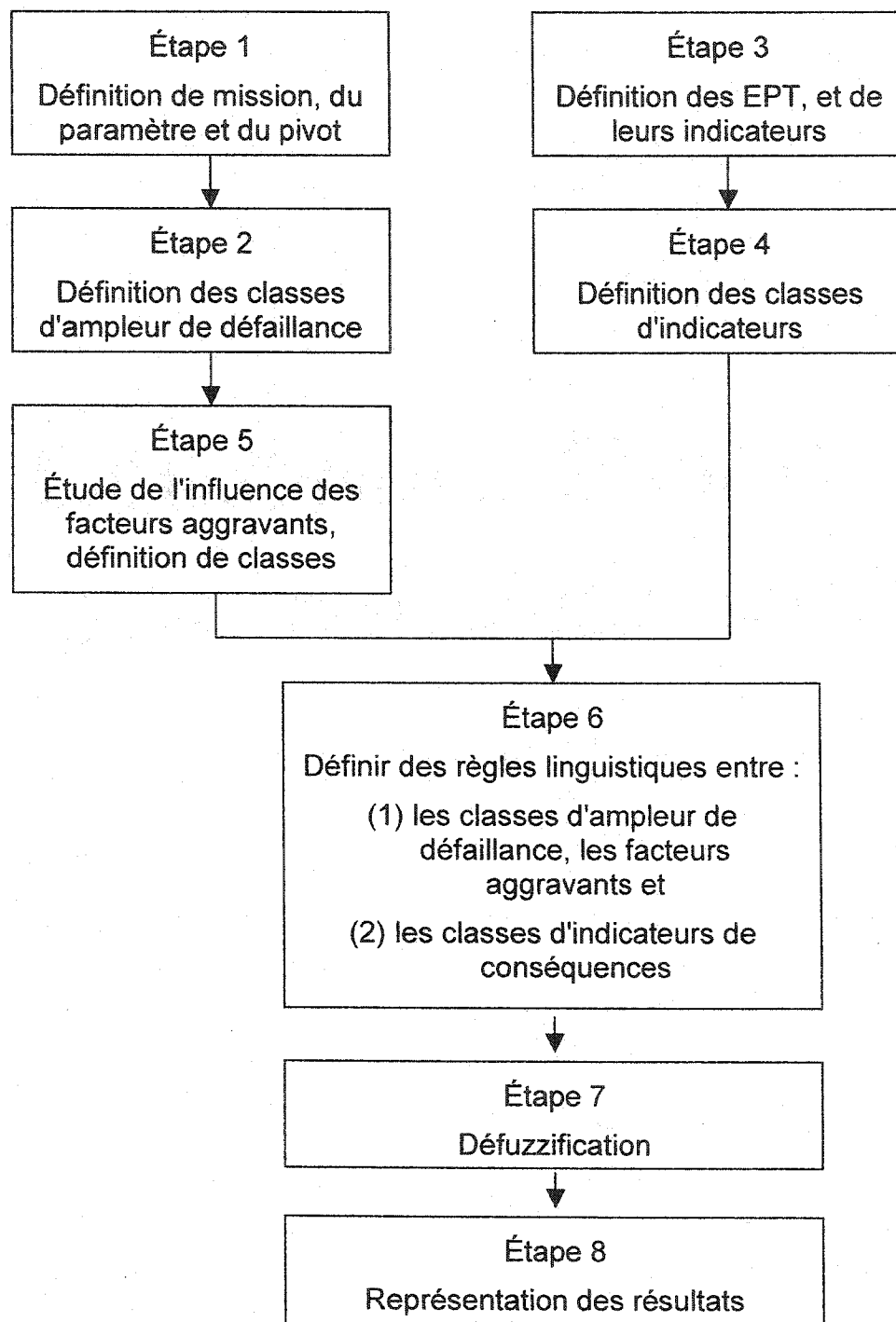


Figure 3-11 : Méthodologie globale

CHAPITRE 4 : APPLICATION - INTÉGRATION DES CONSÉQUENCES D'INONDATION SUR LA SANTÉ HUMAINE

4.1 Problématique

Les bris de conduites d'eau peuvent entraîner des inondations et/ou des infiltrations dans les habitations. L'eau vient imprégner les matériaux qui deviennent alors des sources de prolifération de moisissures et d'acariens. Ces derniers contribuent à diminuer fortement la qualité de l'air en dégageant des substances allergènes. Respirées, ces substances sont sources de dégradation de la santé humaine. Ces phénomènes ont été d'autant plus observés récemment que les maisons sont de plus en plus étanches et donc de moins en moins ventilées (INSPQ, 2002).

4.2 Formalisation de la problématique

Le réseau étudié est le réseau d'eau potable. La mission prise en compte est la mission qui consiste à prévenir tout débordement d'eau. Cette mission est de

type "empêcher un débordement de matière". Une des conséquences directes de la défaillance de cette mission est la diminution de la qualité de l'air dans les habitations. Soit EPT1, l'élément potentiellement touché qui correspond à la qualité de l'air dans les habitations.

Une des conséquences indirectes de la défaillance de cette mission est l'apparition de problèmes de santé chez la population. Soit EPT2, l'élément potentiellement touché qui correspond à la santé de la population.

La Figure 4-1 ci-dessous résume les différentes entités et mécanismes entrant en jeu dans l'étude des conséquences.

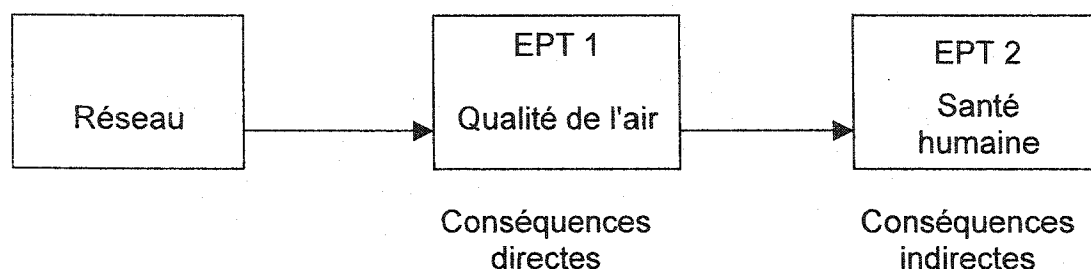


Figure 4-1 : Formalisation des conséquences

4.3 Méthodologie

Le réseau étudié est le réseau d'eau potable.

4.3.1 Étape 1 : définition de la mission, du paramètre et du pivot

La mission étudiée du réseau d'eau potable est de contenir les débordements d'eau, c'est-à-dire éviter les fuites ou les bris de conduites.

Les paramètres les plus déterminants dans la génération des conséquences sont les suivants :

- le débit d'eau de la fuite ;
- la qualité de l'eau.

Le débit d'eau est un paramètre quantitatif, il est donc directement mesurable. La qualité de l'eau est en fait une combinaison de plusieurs paramètres. En effet, il existe de nombreux paramètres pouvant traduire la qualité de l'eau. C'est le cas par exemple du taux de coliformes fécaux, du taux de chlore, du taux d'arsenic, azote,... Il est donc difficile d'estimer la qualité de l'eau de manière précise et objective. Cependant un expert peut porter un jugement et estimer de manière globale la qualité de l'eau en lui attribuant des valeurs qualitatives. Contrairement à un débordement de rivière, la qualité de l'eau provenant d'une fuite ou d'un bris de conduite est relativement homogène. Pour cette raison, nous ne retiendrons pas la qualité de l'eau comme paramètre de la mission.

Choix de la valeur pivot :

La valeur pivot est la valeur à partir de laquelle le gestionnaire du réseau juge l'entrée en défaillance.

La valeur pivot du débit de fuite que nous choisissons est la valeur à partir de laquelle une fuite est repérable. Dans une étude faite par Soyer (2003) sur le réseau de la ville de Nancy en France, cette valeur est $0.5 \text{ m}^3/\text{h}$.

4.3.2 Étape 2 : définition des classes d'ampleur de défaillance

Pour définir les classes de défaillances, nous avons utilisé une étude réalisée sur la ville de Colmar (Lamande et Albaladejo, 2002) qui donne une répartition des fuites en fonction de leur taille. Les résultats sont résumés dans la Figure 4-2.

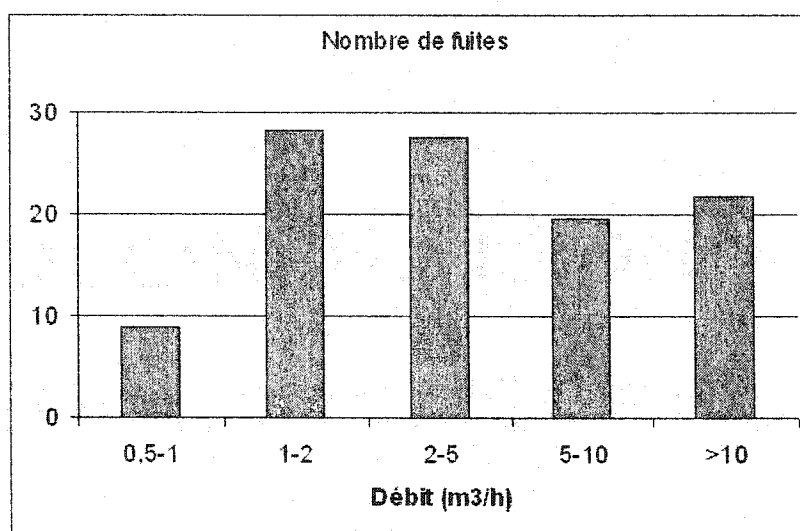


Figure 4-2 : Répartition des fuites à Colmar

Ce résultat nous indique que seulement 80% des fuites sont inférieures à 10 m³/h. Nous avons donc intérêt à détailler les classes d'ampleur de défaillance dans cette plage de débits de fuite.

Nous définissons quatre classes d'ampleur de défaillance :

- Faible : de 0 à 5 m³/h, l'ampleur de la défaillance appartient à 100 % à la classe Faible ; entre 5 et 10 m³/h, l'appartenance à la classe Faible de l'ampleur de la défaillance passe progressivement de 100 à 0 %.

- Moyenne : entre 5 et 10 m³/h, l'appartenance à la classe Moyenne de l'ampleur de la défaillance passe progressivement de 0 à 100 % ; de 10 à 15 m³/h, l'ampleur de la défaillance appartient à 100 % à la classe Moyenne ; entre 15 et 20 m³/h, l'appartenance à la classe Moyenne de l'ampleur de la défaillance passe progressivement de 100 à 0 %.
- Forte : entre 15 et 20 m³/h, l'appartenance à la classe Forte de l'ampleur de la défaillance passe progressivement de 0 à 100 % ; de 20 à 30 m³/h, l'ampleur de la défaillance appartient à 100 % à la classe Forte ; entre 30 et 40 m³/h, l'appartenance à la classe Forte de l'ampleur de la défaillance passe progressivement de 100 à 0 %.
- Très forte : entre 30 et 40 m³/h, l'appartenance à la classe Très forte de l'ampleur de la défaillance passe progressivement de 0 à 100 % ; de 40 à 100 m³/h, l'ampleur de la défaillance appartient à 100 % à la classe Très forte.

Le résultat de la quantification de l'ampleur de la défaillance est présenté à la Figure 4-3.

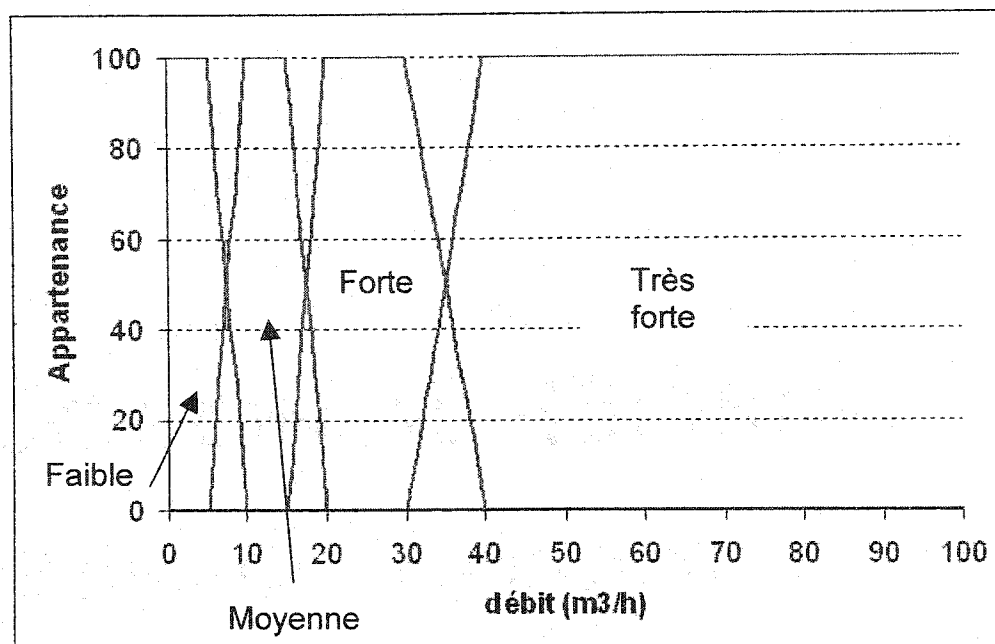


Figure 4-3 : Quantification floue de l'ampleur de défaillance

4.3.3 Étape 3 : définition des éléments potentiellement touchés et de leurs indicateurs

L'EPT 1 étudié dans cet exemple d'application est la qualité de l'air.

Il existe différents indicateurs pour décrire la qualité de l'air (INSPQ 2002) :

- le taux d'humidité en % ;
- la concentration d'allergènes en Unités Formatrices de Colonies (UFC/m³).

Nous retiendrons le taux d'UFC/m³ car cet indicateur semble prédominer dans la littérature.

L'EPT 2 est la santé humaine

Il n'existe pas d'indicateur unique pour décrire l'état de la santé humaine. Par contre, dans la nomenclature médicale, il existe cinq types d'effets possibles sur la santé (INSPQ, 2002), décrits ci-après.

Les effets irritatifs

Les irritations sont principalement dues aux particules fongiques telles que les spores dans l'air qui viennent en contact direct avec les muqueuses. De plus cette irritation mécanique peut s'accompagner d'une irritation chimique due aux produits irritants ou toxiques (Les Composants Organiques Volatiles par exemple) contenus dans les spores.

Les effets infectieux

Les moisissures responsables des infections peuvent être présentes dans les milieux hospitaliers. Il s'agit de l'aspergillose invasive qui peut être responsable de conséquences graves ou même fatales pour les personnes immunodéprimées.

Les effets toxiques

Les effets toxiques sont observés dans les milieux où les concentrations sont élevées et répétitives comme dans les milieux agricoles ou industriels. Les

symptômes observés sont la pneumonite d'hypersensibilité ou l'ODTS (Organic Dust Toxic Syndrom, syndrome toxique de poussières organiques). Dans le premier cas, l'exposition aux micro-organismes cause une sensibilisation progressive aux irritants de poussières organiques.

Les réactions immunologiques

Les réactions allergiques provoquées par l'inhalation de spores fongiques constituent un problème de santé reconnu par les cliniciens depuis des décennies. La rhinite allergique et l'asthme sont des exemples de maladies de type allergique, associées entre autres à une exposition aux moisissures. Le seuil de réactivité varie d'un individu à l'autre et selon le type de moisissure pour un même individu. Il a aussi été démontré que la sévérité de la réaction dépend d'un grand nombre de facteurs et n'est donc pas seulement proportionnelle à la dose d'exposition.

Les maladies chroniques

Il existe très peu de données sur les maladies chroniques dans la littérature. L'effet cancérigène des concentrations de mycotoxines dans les milieux résidentiels n'a pas encore fait l'objet d'études.

4.3.4 Étape 4 : définition des classes d'indicateurs

Il existe encore peu d'études qui décrivent précisément les effets sur la santé associés aux concentrations de moisissures dans l'air.

Plusieurs auteurs comme Santé Canada (1995) considèrent que jusqu'à 500 UFC/m³, la concentration est acceptable.

Le rapport scientifique de l'INSPQ (INSPQ, 2002) sur les risques à la santé associés à la présence de moisissures en milieu intérieur mentionne une étude (Seuri et al., 2000) qui a observé un diagnostic de maladie allergique chez 11 personnes sur 14 exposées à une concentration en moisissure de 1 400 UFC/m³. Nous pouvons interpréter ce résultat de la manière suivante : 1 400 UFC/m³ appartient à la classe forte avec une certitude de 11/14 soit environ 80%.

Une autre étude (Garrett et al., 1998) mentionne des cas de toux pour des concentrations supérieures à 500 UFC/m³.

Malheureusement, nous ne disposons pas d'autres résultats de ce type. Nous pouvons néanmoins essayer de définir trois classes en fonction de la gravité des pathologies observées :

- Acceptable : ces concentrations sont couramment observées et ne s'accompagnent pas de symptômes connus. Jusqu'à 500 UFC/m³, la concentration est Acceptable à 100%. De 500 à 750 UFC/m³ l'appartenance à la classe Acceptable passe progressivement de 100 à 0%.

- Moyenne : ces concentrations s'accompagnent de symptômes légers de types irritatifs. De 500 à 750 UFC/m³, l'appartenance à la classe Moyenne passe progressivement de 0 à 100%. De 750 à 1 200 UFC/m³ la concentration en moisissures appartient à 100% à la classe Moyenne. De 1 200 à 1 400 UFC/m³ l'appartenance à la classe Moyenne passe progressivement de 100 à 0%.
- Forte : ces concentrations s'accompagnent d'effets plus importants sur la santé de type infectieux, toxique, immunologique ou encore des maladies chroniques. De 1 200 à 1 450 UFC/m³ l'appartenance à la classe Forte passe progressivement de 0 à 100%. De 1 450 à 1 500 UFC/m³ la concentration en moisissure appartient à 100% à la classe Forte.

La Figure 4-4 donne le résultat de la quantification floue de la concentration en moisissures.

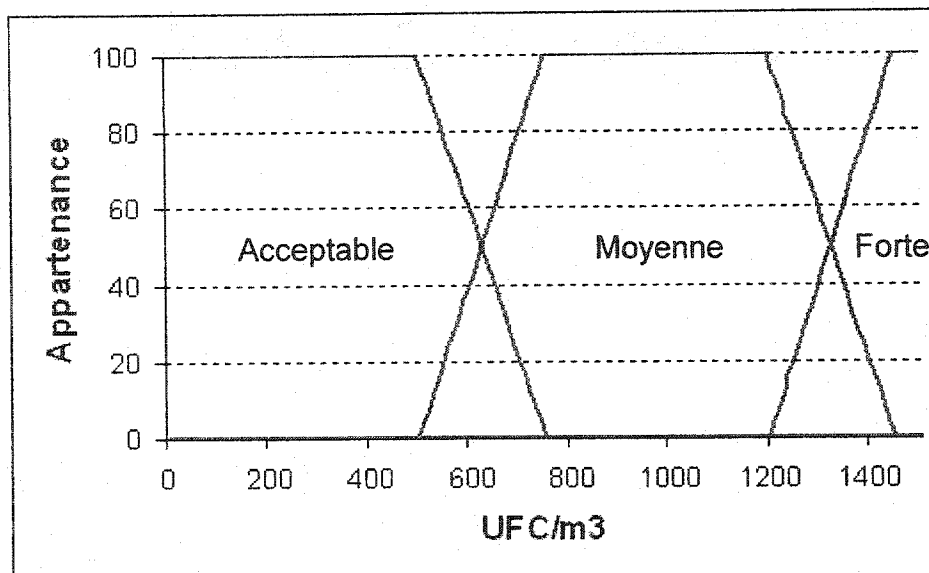


Figure 4-4 : Quantification floue de la qualité de l'air

4.3.5 Étape 5 : étude de l'influence des facteurs aggravants

La durée de la défaillance est un facteur aggravant important car il est directement lié à la quantité d'eau échappée.

Nous avons défini trois classes de durée de manière symétrique autour de 36 heures que nous avons estimées comme durée moyenne :

- Courte
- Moyenne
- Longue

Ces classes sont représentées à la Figure 4-5.

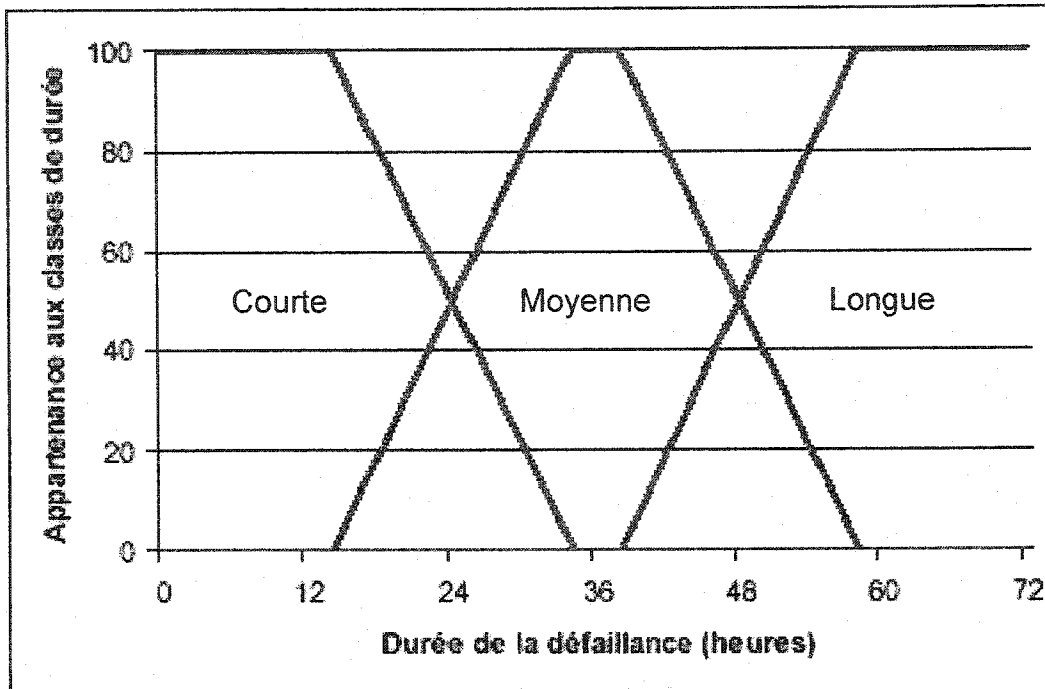


Figure 4-5 : Quantification floue de la durée

4.3.6 Étape 6 : définition des règles linguistiques

Les règles entre (1) les classes d'ampleur de défaillance et de durée et (2) les classes de concentration en moisissures sont données dans le Tableau 4-1.

Tableau 4-1 : Règles linguistiques donnant les classes de qualité de l'air

Concentration en moisissures		Ampleur de la défaillance			
		Faible	Moyenne	Forte	Très forte
Durée	Courte	Acceptable	Acceptable	Moyenne	Forte
	Moyenne	Acceptable	Moyenne	Moyenne	Forte
	Longue	Moyenne	Forte	Forte	Forte

Pour que la concentration en moisissures soit " Forte ", il faut qu'il y ait une grande quantité d'eau. Cela se produit d'autant plus lorsque la durée de défaillance est " Longue " ou que l'ampleur de la défaillance est " Très forte ".

Pour que la concentration en moisissure soit " Acceptable ", il faut qu'il y ait une ampleur de défaillance " Faible " ou " Moyenne " avec une durée " Courte " ou " Moyenne ".

La concentration " Moyenne " est un résultat intermédiaire des combinaisons précédentes.

Ces règles devront être validées par des experts des domaines de la santé publique, des réseaux d'eau potable et de la microbiologie.

4.3.7 Étape 7 : défuzzification

Les calculs ont été réalisés avec le logiciel Excel selon la méthode exposée au paragraphe 2.6.

4.3.8 Étape 8 : représentation des résultats

Nous avons choisi trois modes de représentation :

- un graphique exprimant la concentration en moisissures (conséquences) en fonction de l'ampleur de la défaillance pour trois durées (10, 30 et 60 heures) que nous avons choisies pour l'exemple (Figure 4-6);
- un graphique exprimant la concentration en moisissures (conséquences) en fonction de la durée de défaillance pour trois amplitudes de défaillance (2, 20 et 50 m³/h) que nous avons choisies pour l'exemple (Figure 4-7);
- un graphique en trois dimensions exprimant la concentration en moisissures (conséquences) en fonction de l'ampleur et de la durée de défaillance (Figure 4-8).

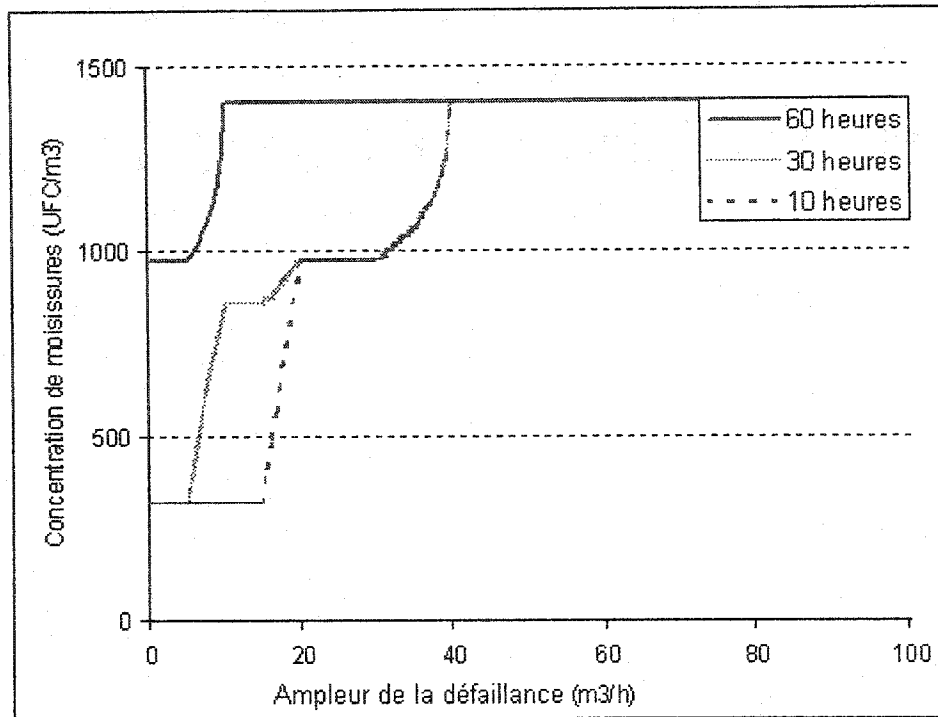


Figure 4-6 : Qualité de l'air en fonction de l'ampleur de la défaillance

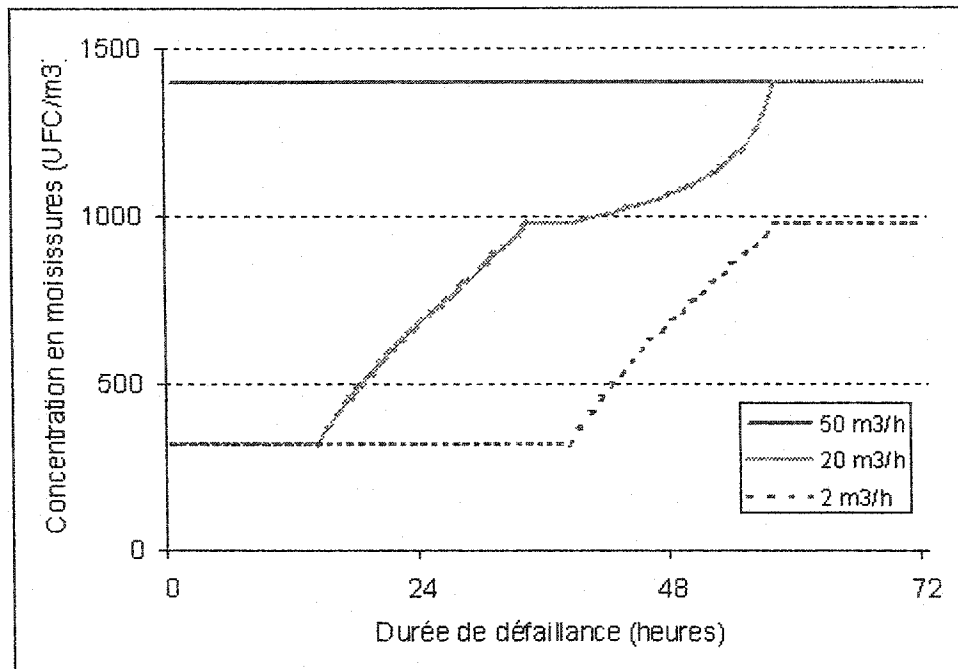


Figure 4-7 : Qualité de l'air en fonction de la durée de la défaillance

Les courbes de la Figure 4-6 indiquent que peu importe la durée de défaillance, le passage d'une ampleur de défaillance du débit de 10 à 20 m³/h est critique. La Figure 4-7 donne une idée du temps de réaction dont disposent les gestionnaires de mesure d'urgence. Lorsque l'ampleur de défaillance est de 2m³/h, le temps de réaction est d'environ 48 heures (pointillés) alors que lorsque l'ampleur de la défaillance est de 20 m³/h, ce temps est d'environ 24 heures (grisé) si l'on fixe une tolérance de 750 UFC/m³ en terme de concentration en moisissures.

A partir de ces courbes, des seuils vont pouvoir être établis en terme de mesures de planification mais également en mesures d'atténuation et de prévention. Dans une situation donnée, les gestionnaires des mesures d'urgences pourront savoir, d'après l'allure de la courbe, quelle est la tendance d'évolution possible. Ils pourront ainsi avoir une idée de la criticité de la situation. Par exemple, d'après la Figure 4-7, si la situation dure 36 heures et correspond à une ampleur de défaillance de 20 m³/h, les conséquences n'augmenteront que faiblement si la durée augmente car la courbe a une pente très faible à ce niveau. Par contre, si l'ampleur de la défaillance augmente pour une même durée, la Figure 4-6, montre que les conséquences vont augmenter fortement car la pente de la courbe est forte à ce niveau.

La Figure 4-8 résume toutes ces possibilités et présente les résultats sous forme d'une courbe en trois dimensions.

Sur cette figure, le point A, de coordonnées 40 m³/h d'ampleur de défaillance et 20 heures de durée de défaillance se situe à un niveau de conséquences de 900 UFC/m³.

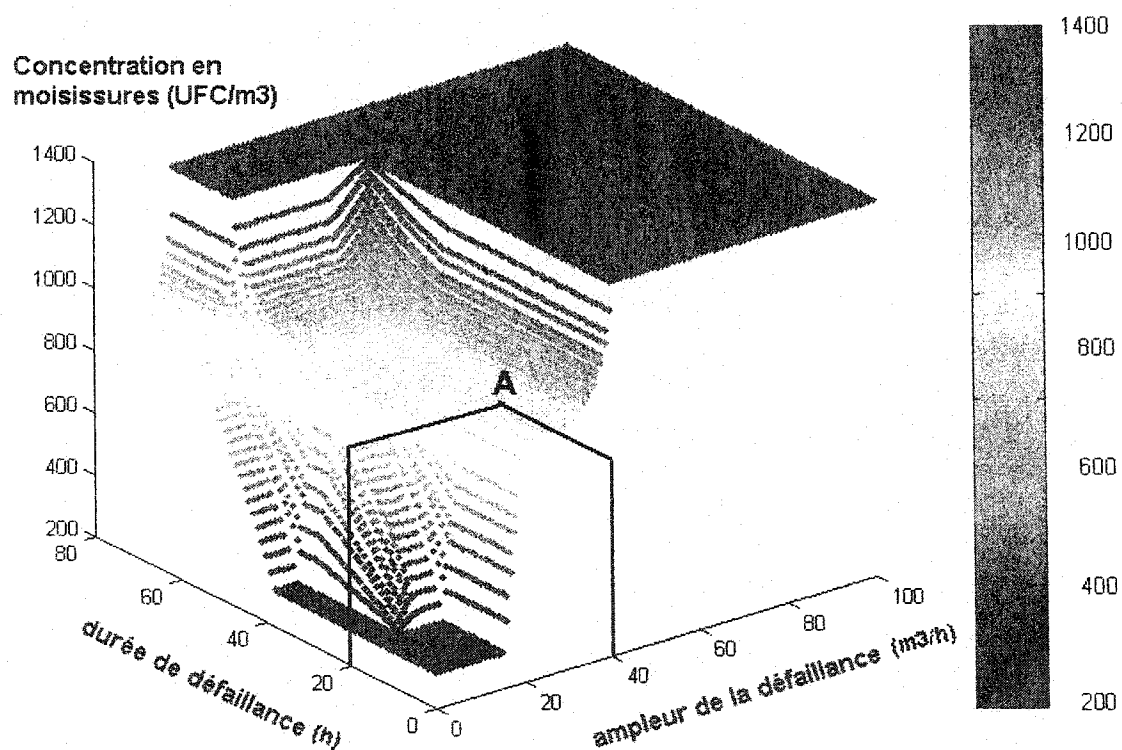


Figure 4-8 : Qualité de l'air en fonction de l'ampleur et la durée de la défaillance

4.3.9 Utilisation des résultats

Nous mentionnons quelques utilisations possibles de ces courbes.

1. Les changements de pente de la courbe font ressortir des points critiques en terme d'ampleur et de durée de défaillance. Ces points critiques peuvent servir à définir des valeurs seuils pour mener des actions en terme de planification et prévention des mesures d'urgence. Par exemple, sur la Figure 4-9, une des valeurs seuil est de $48 \text{ m}^3/\text{h}$.

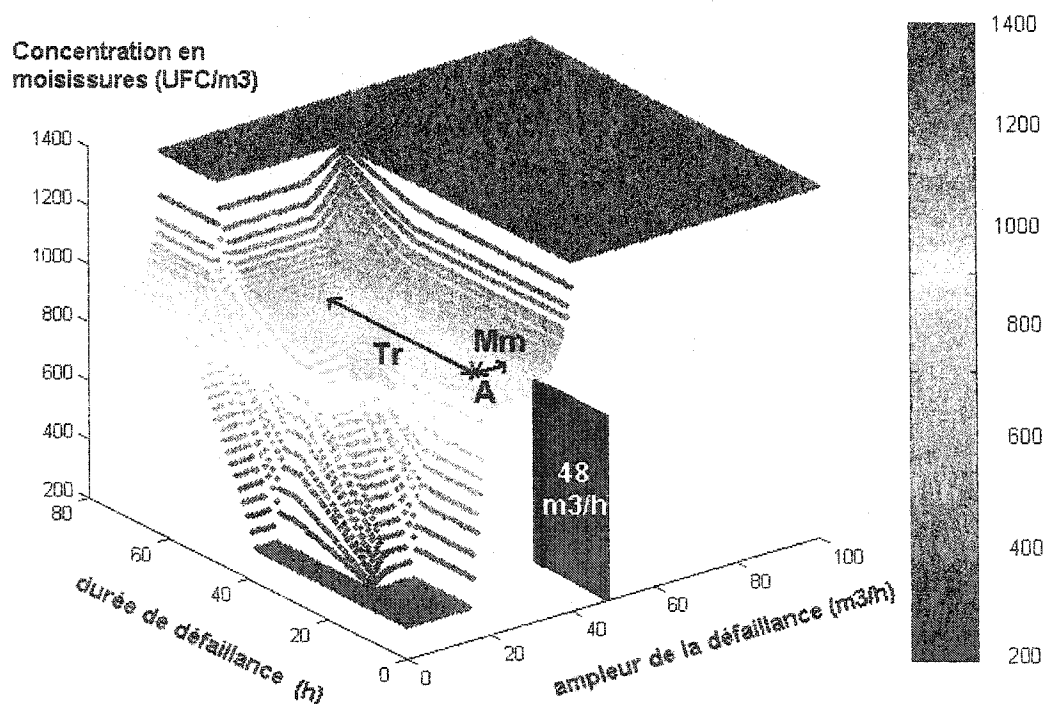


Figure 4-9 : Interprétation

2. En ce qui concerne la gestion de l'urgence, nous pouvons représenter la situation par un point sur la courbe (de coordonnées la durée et l'ampleur de défaillance de cette situation). Par exemple nous pouvons situer le point A sur la Figure 4-9. Nous pouvons alors visualiser si un déplacement de ce point selon l'axe de durée ou d'ampleur va entraîner une forte augmentation des conséquences. En ce qui concerne l'axe de la durée, la distance que peut parcourir ce point sans augmentation significative des conséquences nous donnera une idée du temps de réaction (T_r sur la Figure 4-9) disponible sans augmentation des conséquences. De la même manière nous pouvons définir la marge de manœuvre (M_m sur la Figure 4-9) comme la distance que peut parcourir ce point sur l'axe d'ampleur de défaillance sans augmentation significative des conséquences (ou avant la valeur seuil).
3. Il est également possible de visualiser sur ces courbes le retour à la normale, c'est-à-dire le passage d'un point A au point d'abscisses (0,0). Pour cela nous devons faire une distinction entre les études qui impliquent des phénomènes réversibles et celles qui impliquent des phénomènes irréversibles. Par exemple, le fait que le débit de fuite diminue n'implique pas la disparition des moisissures pour autant car un traitement pour les éliminer est nécessaire. Lorsque l'ampleur de la défaillance augmente, les conséquences augmentent mais lorsque

l'ampleur de la défaillance diminue, les conséquences ne diminuent pas de la même façon : le phénomène est irréversible. Par conséquent la courbe présentée ne suffit pas pour planifier le retour à la normale dans ce cas.

En connaissant l'évolution de l'ampleur de la défaillance en fonction du temps, il est possible de tracer une courbe représentant l'évolution des conséquences dans le temps en fonction de l'ampleur de la défaillance. La Figure 4-10 présente l'allure des ces courbes pour des phénomènes réversibles et irréversibles. Ces courbes représentent l'évolution d'une situation donnée selon le sens des flèches.

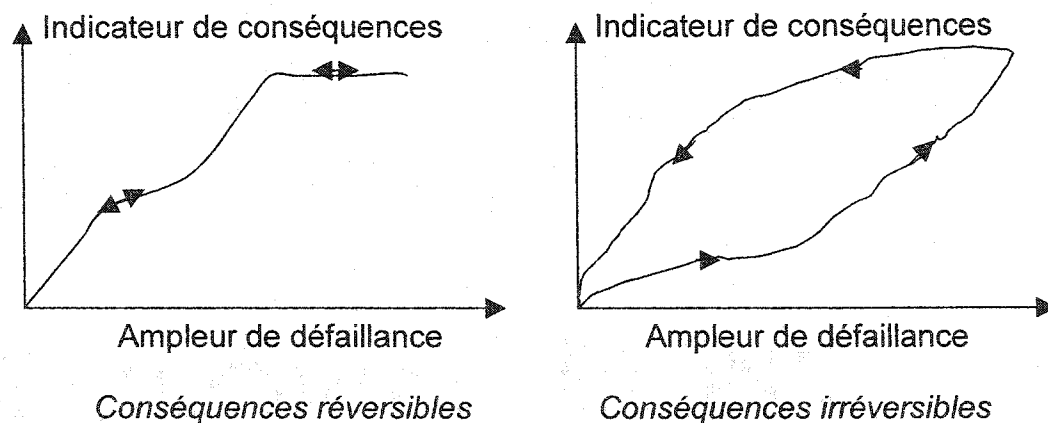


Figure 4-10 : Conséquences réversibles et irréversibles

L'étude de la réversibilité pourrait constituer un axe de développement dans la représentation des résultats.

Dans le cas où le phénomène est réversible, il est possible de visualiser sur la courbe, les différents chemins du retour à la normale. La Figure 4-11 montre un exemple avec deux chemins possibles. Lorsqu'il a un tel choix, le gestionnaire de mesure d'urgence pourra visualiser les possibilités sur la courbe, ce qui l'aidera dans sa décision.

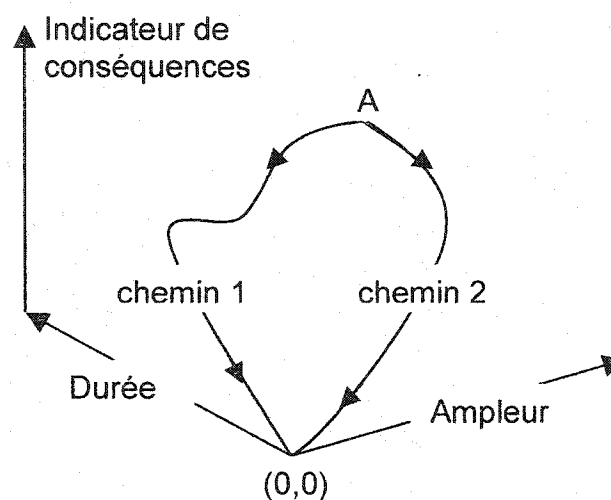


Figure 4-11 : Retour à la normale

4. Ces courbes constituent des moyens de communication efficaces et pérennes entre d'une part les gestionnaires des réseaux de support à la vie interdépendants et d'autre part les différentes instances gouvernementales. En effet, en étant visuelles, elles peuvent constituer un outil pour convaincre différents partenaires de prendre les actions

nécessaires afin de minimiser les conséquences. De plus, elles regroupent des informations issues de nombreuses expertises.

CONCLUSION

La méthode proposée permet d'analyser de manière systématique les variables qui conduisent à l'obtention des conséquences. L'utilisation de la logique floue permet de formaliser ces variables et de lever l'incertitude sur la subjectivité relative des experts. Ainsi, des valeurs réelles sont attribuées aux termes qualitatifs que sont " Faible ", " Moyen " ou " Fort ". Ce formalisme aboutit à une méthode standard qui peut s'appliquer à tous les réseaux de support à la vie.

Les courbes de conséquences obtenues sont des outils d'aide à la décision pour les gestionnaires de mesures d'urgence. Elles fournissent des informations en terme de temps de réaction et d'ampleur de défaillance critique. D'autre part, la détermination des conséquences constitue une part de l'évaluation du risque, souvent définie comme une combinaison du couple probabilités – conséquences (Seidou, 2002). Ainsi, cette méthode constitue partiellement un outil d'évaluation des risques. Les gestionnaires pourront mieux se préparer aux différentes éventualités et mettre en place les mesures d'atténuation correspondantes. Ne sommes nous pas d'autant mieux préparés à un danger que lorsque nous sommes conscients de son éventualité ? Enfin, ces gestionnaires pourront communiquer aux gestionnaires d'autres réseaux

les résultats de leurs études de conséquences. Or une des problématiques des effets domino est la communication entre les réseaux. De cette manière, la méthode est une contribution à l'étude des effets domino entre réseaux.

La force et l'intérêt d'une telle démarche est qu'elle reste indépendante de tout scénario car elle prend en compte l'ensemble des situations possibles. En effet, si les événements auxquels nous devons faire face sont de nature infiniment variée (conditions météorologiques, attentats, erreurs humaines,...), les scénarios constituent quant à eux, un nombre fini de situations. Les résultats sous forme de courbe, sont des outils d'analyse mais également de communication. Robert et al. (2001) dénombrent quatre utilisations principales des courbes de conséquences. (1) Communication : les gestionnaires des réseaux pourront communiquer leurs résultats aux gestionnaires des réseaux avec lesquels ils sont en interaction. Cette communication est un outil de gestion active du risque. (2) Prévention, préparation et planification des mesures d'urgences : les points critiques des courbes serviront à définir des valeurs seuils en terme de temps de réaction et d'ampleur de défaillance à ne pas dépasser. (3) Atténuation et gestion de la situation d'urgence : les courbes permettent de prévoir l'évolution de la situation de la crise car elles représentent toutes les situations possibles. De plus la gestion des ressources pourra être optimisée. (4) Retour à la normale : à partir d'une situation de crise donnée, il est possible de planifier et de suivre sur les courbes la meilleure façon pour revenir à une situation acceptable.

Cependant, il est vrai que cette méthode demande l'intervention de nombreux experts, et peut être fastidieuse à mettre en place. Une des voies d'amélioration en ce sens pourrait être l'utilisation des techniques d'apprentissage, similaires à celles utilisées dans les réseaux de neurones. De telles techniques pourraient être utilisées lors de la définition des classes et des règles linguistiques. Cependant, et cela est rassurant dans un sens, la science du risque ne dispose pas d'une quantité importante de données pour réaliser l'apprentissage. Mentionnons enfin que l'application de la méthodologie pourrait être facilitée par le développement d'un outil informatique qui automatiserait et standardiserait l'application de la méthode. Cet outil informatique pourrait synthétiser les différentes courbes obtenues pour tous les éléments potentiellement touchés. D'autre part, un couplage de la méthodologie avec les systèmes d'information géographique pourrait être extrêmement intéressant dans la planification des mesures d'urgence en donnant une représentation géographique des conséquences. Enfin, un des concepts définis mais non abordé dans la méthodologie est l'évaluation des conséquences indirectes. Ces dernières doivent être prises en compte pour obtenir une évaluation globale des conséquences. Une des solutions éventuellement envisageable serait de répéter la méthodologie de manière itérative.

RÉFÉRENCES

BOUCHON-MEUNIER, B. (1993). La logique floue, Presse universitaires de France, Collection Que sais-je ?.

DUPONT, A. (1965). Hydraulique urbaine, Éditions Eyrolles, Paris.

GABRIEL, P. (2001). Université de Liège, Introduction à la logique floue et à la commande floue, source : <http://elap.montefiore.ulg.ac.be/fuzzy>, page consultée le 05/08/2003.

GACÔGNE, L. (1997). Éléments de logique floue, Editions Hermès, Paris.

GARRETT, M.H., RAYMENT, P.R., HOOPER, M.A., ABRAMSON, M.J et HOOPER, B.M. (1998). Indoor airborne fungal spores, house dampness and association with environmental factors and respiratory health in children. Clinical and Experimental Allergy 28: 459-467.

GODJEVAC, J. (1999). Idées nettes sur la logique floue, Presses polytechniques et universitaires romandes, première édition, collection informatique.

INSPQ (2002). Les risques à la santé associés à la présence de moisissures en milieu intérieur, Institut National de Santé Publique du Québec, Direction des risques biologiques, environnementaux et occupationnels et laboratoire de santé publique du Québec.

LABONTÉ, R. et PATRY, G. (1987). Distribution et collecte des eaux en milieu urbain, 3^{ème} édition, Notes de cours, École Polytechnique de Montréal.

LAMANDE, S. et ALBALADEJO, H. (2002). Sectorisation des réseaux d'eau potable TSM no 6.

MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT DU QUÉBEC (août 2002). Directive 001, Captage et distribution de l'eau.

ROBERT, B., MARCHE, C. et ROUSELLE, J. (2001). Outils d'aide à la décision pour les plans de gestion des aménagements hydroélectriques. Congrès annuel 2001 de l'ACB, Fredericton, (N.-B.) Canada. 39-46.

ROBERT, B., SABOURIN, J.-P., GLAUS, M., PETIT, F., SENAY, M.-H. (2003). A New Structural Approach for the Study of Domino Effects between Life

Support Networks. *Building Safer Cities : The Future of Disaster Risk*.

Washington, D. C. Disaster Management Facility, The World Bank. 245-272.

SANTÉ CANADA (1995). Contamination fongique dans les immeubles publics.

Guide facilitant la détermination et la gestion des problèmes. Comité fédéral-provincial de l'hygiène du milieu et du travail.

SEIDOU, O. (2002). Intégration du risque dans les modes de gestion des systèmes hydriques. Philosophiae Doctor Thesis (Ph.D.), Ecole Polytechnique de Montréal.

SEURI, M., HUSMAN, K., KINNUNEN, H., REIMAN, M., KREUS, R., KURONEN, P., LEHTOMAKI et K., PAANANEN, M. (2000). An Outbreak of Respiratory Diseases among Workers at a Water-Damaged Building- A Case Report. Indoor Air, 10(3) : 138-145.

SOYER, H. (2003). Pertes d'eau en réseau, AREED Nancy, présentation, source : www.cendotec.org.br/aspef/arquiros/seminario.pdf, page consultée le 01/10/2003.

ZADEH, L.A. (1965). " Fuzzy sets ", information and control, n°8, p.338-353.

ANNEXE

ANNEXE 1 :

CALCUL DE L'AIRE SOUS UNE FONCTION D'APPARTENANCE

TRAPÉZOÏDALE ET DE SON CENTRE DE GRAVITÉ

Soit μ une fonction d'appartenance trapézoïdale (Figure 1, équation (1))

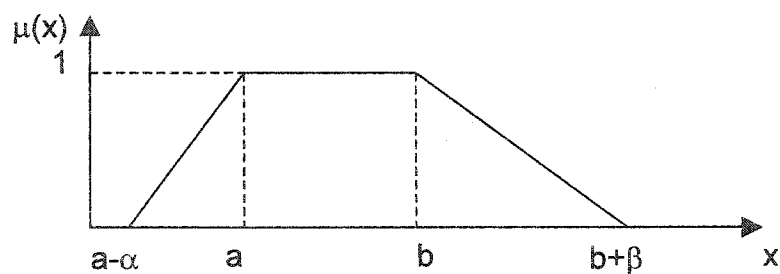


Figure I-1 : fonction d'appartenance trapézoïdale

Cette fonction a pour équation :

$$\mu(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x < a - \alpha \text{ ou } x > b + \beta \\ 1 & \text{si } a < x < b \\ 1 + (x - a) / \alpha & \text{si } a - \alpha < x < a \\ 1 + (b - x) / \beta & \text{si } b < x < b + \beta \end{cases} \quad (1)$$

Lorsque le trapèze est tronqué à une hauteur H , nous obtenons la figure grisée.

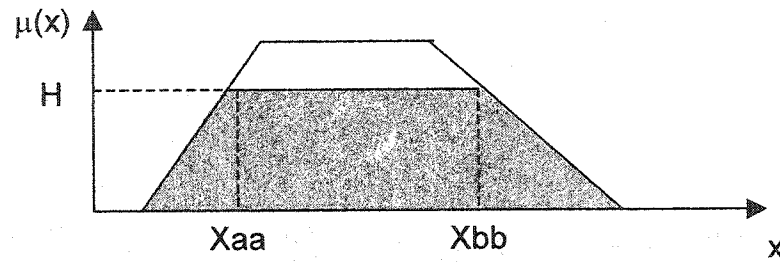


Figure I-2 : trapèze tronqué

X_{aa} et X_{bb} sont les solutions de $\mu(x)=1$

D'après l'équation (1) :

$$X_{aa}=a+\alpha(H-1) \quad (2)$$

$$X_{bb}=b-\beta(H-1) \quad (3)$$

Notons L et B respectivement la petite base et la grande base du trapèze tronqué.

$$L = X_{bb} - X_{aa} \quad (4)$$

$$B = b - a + \alpha + \beta \quad (5)$$

L'ordonnée du centre de gravité du trapèze tronqué est donnée par (Gabriel, 2001) :

$$Y_G = \frac{B+2L}{3(B+L)} H \quad (6)$$

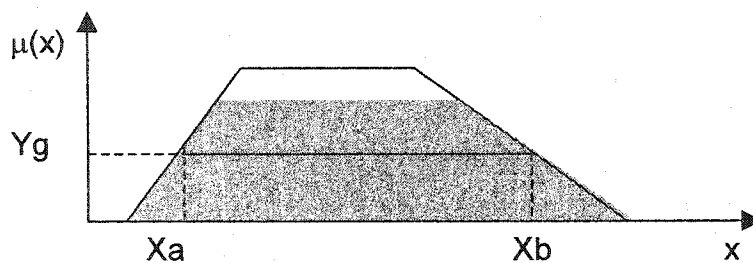


Figure I-3 : ordonnée du centre de gravité du trapèze tronqué

Xa et Xb sont les solutions de $\mu(x) = Y_G$

D'après l'équation (1) :

$$Xa = a + \alpha(Y_G - 1) \quad (7)$$

$$Xb = b - \beta(Y_G - 1) \quad (8)$$

L'abscisse X_G du centre de gravité du triangle grisé est alors donnée par (Gabriel, 2001) :

$$X_G = \frac{Xa + Xb}{2} \quad (9)$$

La surface S du trapèze tronqué est donné par la formule de l'aire du trapèze :

$$S = \frac{B+L}{2} H \quad (10)$$

Dans le Tableau A-1, nous donnons les résultats des calculs pour l'ampleur de défaillance de 320 kPa pour le problème de la pression d'eau potable (paragraphe 3.2.7).

Tableau A-1 : Calculs de l'abscisse du centre de gravité et de l'aire des trapèzes

Classe							
Faible	a	b	α	β	H	Xaa	Xbb
	500	1000	500	500	0.6	300	1200
	L	B	Y_G	Xa	Xb	X_G	S
	900	1500	0.275	137	1362	750	720
Moyen	a	b	α	β	H	Xaa	Xbb
	1500	5000	500	2000	0.4	1200	6200
	L	B	Y_G	Xa	Xb	X_G	S
	5000	6000	0.194	1097	6612	3854	2200