



Développement d'une méthode de modélisation pour l'évaluation de la performance de stratégies de sécurité incendie

Anne Muller

► To cite this version:

Anne Muller. Développement d'une méthode de modélisation pour l'évaluation de la performance de stratégies de sécurité incendie. Autre. Université de Haute Alsace - Mulhouse, 2010. Français. NNT : 2010MULH4931 . tel-00593716

HAL Id: tel-00593716

<https://theses.hal.science/tel-00593716>

Submitted on 17 May 2011

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

UNIVERSITÉ DE HAUTE ALSACE
ÉCOLE DOCTORALE 494 « JEAN HENRI LAMBERT »

Thèse présentée par
Anne Muller

pour obtenir le grade de
DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE HAUTE ALSACE
dans la discipline du Génie des Procédés

DÉVELOPPEMENT D'UNE MÉTHODE
DE MODÉLISATION POUR
L'ÉVALUATION DE LA PERFORMANCE
DE STRATÉGIES DE SÉCURITÉ
INCENDIE

Présentée et soutenue publiquement le 8 décembre 2010
devant un jury composé de

Pr. Michel HASSENFORDER	Université de Haute-Alsace	Président
Pr. Yves DUTUIT	Université de Bordeaux I	Rapporteur
Pr. Laurent PERRIN	École Nationale Supérieure des Industries Chimiques de Nancy	Rapporteur
Pr. Jean-François BRILHAC	Université de Haute Alsace	Directeur de thèse
Dr. Mejdj JEGUIRIM	Université de Haute Alsace	Co-directeur de thèse
Dr. François DEMOUGE	Centre Scientifique et Technique du Bâtiment	Examineur
M. Philippe FROMY	Centre Scientifique et Technique du Bâtiment	Invité
Dr. Stéphane GRÉS	Université Technologique de Compiègne	Invité
Dr. Hervé TEPHANY	Ministère de l'Intérieur, Direction de la Sécurité Civile	Invité

AVANT-PROPOS

De nombreuses personnes ont apporté leur pierre à cet édifice qu'est ma thèse. Je ne saurais continuer sans leur rendre hommage.

Tout d'abord, je souhaite exprimer toute ma gratitude et mon admiration à Jean-François Brilhac, qui a su, avec la plus grande simplicité, être un moteur et un soutien inestimables. Sans les qualités de diplomate et d'encadrant qui doublent ta grande pertinence scientifique, ce travail n'aurait jamais pu aboutir.

Ensuite, je tiens à remercier Philippe Fromy qui a accepté d'encadrer cette expérience doctorale au quotidien, dans les bons comme dans les mauvais jours. J'ai appris beaucoup en te côtoyant et je t'en remercie.

Bien évidemment, je souhaite remercier François Demouge et Mejdi Jeguirim. Merci François pour ta très grande disponibilité et ta patience sans faille. Merci Mejdi d'avoir été tant attentif à mes besoins et de m'avoir dispensé tes conseils avisés. Tu feras il est sûr, un futur directeur de thèse de qualité !

Je profite de cet espace qui m'est donné pour remercier Laurent Perrin et Yves Dutuit d'avoir accepté d'être les rapporteurs de ma thèse. Merci pour le temps et l'énergie que vous m'accordez.

Je souhaite également exprimer ma gratitude aux gens du MIPS, notamment Michel Hassenforder et Laurent Thiry. Vous m'avez apporté l'étincelle qui a permis la conceptualisation de mon travail. J'admire particulièrement Michel Hassenforder pour avoir vu si clair dans ce qui germait dans mon esprit, et pour avoir pu tant m'aider à faire croître mes embryons d'idées.

De la même manière, je souhaite saluer les membres de l'AFSCET, notamment Stéphane Grès, qui a toujours été disponible pour m'aider. Merci à vous d'avoir nourri ma réflexion sur la systémique et de m'avoir redonné confiance lorsque je croyais y perdre pied. Puisque la systémique a été l'une des grandes révélations de ma thèse, je n'ai pas fini de l'intégrer à mes projets de recherche. Nous nous reverrons donc avec certitude, et plaisir !

Au moment de la rédaction de ces remerciements, je pense à Michel Curtat, qui a été, contre vents et marées, à la fois un ami et une référence de qualité. Je pense également à Jean-François Guyonnet, qui m'a reçue et écoutée avec bienveillance, et qui a eu la grande gentillesse de m'ouvrir sa bibliothèque. Je pense encore à Aurélien Thiry, qui m'a opposé son scepticisme de mathématicien et m'a ainsi offert des débats particulièrement enrichissants. Enfin, je pense à Olivier Thibaut, pour son travail de relecture.

D'un point de vue plus personnel, je souhaite remercier ma famille et mes amis pour leur soutien. J'ai une pensée particulière pour mon colocataire et ami Mickaël Parment, qui a vécu cette période doctorale au quotidien, et qui m'a aidée à garder un orteil sur terre.

À présent je ne peux continuer sans remercier la Providence qui a guidé mes pas vers cette expérience doctorale. *In fine*, l'enseignement le plus précieux que j'ai pu recevoir est résumé dans cette maxime latine :

Vanitas vanitatum, et omnia vanitas

RÉSUMÉ

Aujourd'hui en France, l'évaluation de la performance de stratégies de sécurité à déployer pour mettre un bâtiment en sécurité vis-à-vis de l'incendie repose sur une étude d'ingénierie en sécurité incendie. Cette étude a pour objectif l'estimation du risque incendie pour différentes stratégies, et pour des scénarios d'incendies jugés pertinents. Pour parvenir à cette estimation, le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment français (CSTB) a mis au point un outil de simulation appelé SCHEMA-SI. Cet outil utilise des réseaux de Petri prédicat-transition différentiels orientés objets et des simulations de Monte Carlo pour générer de multiples scénarios d'incendie. Ces scénarios sont ensuite utilisés pour évaluer le risque incendie encouru avec une stratégie de sécurité. La stratégie est alors jugée d'autant plus performante que le risque incendie est faible. L'objectif de la thèse consiste à contribuer au développement d'une méthode d'analyse de risque incendie utilisant l'outil de simulation SCHEMA-SI. La réflexion a débuté par la définition de ce que devrait être cette méthode. A ce stade, il est apparu que l'une des difficultés que la méthode doit surmonter est celle de la mise en données du problème par un groupe d'acteurs impliqués dans la sécurité incendie du bâtiment étudié. Pour résoudre cette difficulté, une méthode de modélisation spécifique a été construite. Cette méthode, baptisée ISI-Systema, repose sur deux fondements principaux :

- d'une part, un langage graphique de modélisation permettant au groupe d'acteurs de réfléchir à la mise en données du problème en s'appuyant sur une approche systémique ;
- d'autre part, une démarche de traduction des modèles graphiques obtenus avec le langage systémique en réseaux de Petri compatibles avec SCHEMA-SI.

Enfin, une application pratique de cette méthode de modélisation est proposée.

Mots clefs : Systémique, méthode de modélisation, réseaux de Petri, sécurité incendie.

ABSTRACT

Nowadays in France, building fire safety strategy performance analysis relies on a fire engineering study. This kind of study aims at calculating fire risk for several strategies and for fire scenarios judged as relevant. In order to achieve risk calculation, the French Scientific and technical Building Center (CSTB) has developed a simulation tool called SCHEMA-SI. This tool is based on object-oriented differential predicate-transition Petri nets and on Monte Carlo simulations and is built to generate a large number of fire scenarios. Obtained scenarios are hence used to evaluate fire risk related to the strategy to evaluate. The lower the fire risk is obtained, the more efficient the strategy is considered. This thesis aims at contributing to the development of a SCHEMA-SI based fire risk assessment method. This thesis starts by a definition of what this method should be. At this stage, it appears that one of the difficulties to overcome is the one of the problem definition by a group of fire safety concerned people. In order to solve this difficulty, a modeling method has been developed. This method, so-called ISI-Systema, relies on two main basements:

- in on hand, on a graphic modeling language created to allow a group of people to think about the problem definition by using a systemic approach ;
- on the other hand, on a SCHEMA-SI compatible Petri net – graphic model translation procedure.

At last, a case study is proposed.

Keywords: Systemic approach, modeling method, Petri nets, fire safety.

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION	1
PREMIER CHAPITRE : DONNÉES THÉORIQUES ET CONTEXTUELLES NÉCESSAIRES À LA COMPRÉHENSION DU SUJET ET DE LA MANIÈRE DONT IL A ÉTÉ TRAITÉ	3
I. LE RISQUE INCENDIE.....	3
I.A <i>Rappel sémantique relatif à la notion de risque</i>	3
I.B <i>Les principales sources de danger liées au feu</i>	4
I.C <i>Quelques statistiques concernant les dommages causés par le feu</i>	5
I.D <i>Exemple de déroulement d'incendie</i>	8
II. LA SÉCURITÉ INCENDIE.....	9
II.A <i>Réglementation prescriptive française</i>	9
II.B <i>Ingénierie de la sécurité incendie (ISI)</i>	13
II.C <i>Les mesures de mise en sécurité incendie</i>	17
III. L'OUTIL DE SIMULATION SCHEMA-SI	24
III.A <i>L'outil de simulation CIFI 2009</i>	24
III.B <i>Les réseaux de Petri</i>	28
III.C <i>Couplage entre les réseaux de Petri et CIFI 2009</i>	41
III.D <i>Architecture de l'outil SCHEMA-SI</i>	43
IV. CONCEPTS ET MÉTHODES UTILISÉS EN ANALYSE SYSTÉMIQUE	44
IV.A <i>Système et complexité</i>	44
IV.B <i>Approche systémique et science des modèles</i>	47
IV.C <i>Zoom sur quelques méthodes de modélisation systémique</i>	48
DEUXIÈME CHAPITRE : RÉFLEXION SUR UNE MÉTHODE IDÉALE ET CONSTRUCTION D'UN ITINÉRAIRE DE RECHERCHE	57
I. RÉFLEXION SUR CE QUE SERAIT UNE MÉTHODE IDÉALE INTÉGRANT L'OUTIL DE SIMULATION SCHEMA-SI	58
I.A <i>Logique et objectif d'une étude d'ISI en général</i>	58
I.B <i>Proposition d'une méthode idéale</i>	59
I.C <i>Synthèse</i>	68
II. CONSTRUCTION D'UN ITINÉRAIRE DE RECHERCHE ET CHOIX D'UN POSITIONNEMENT MÉTHODOLOGIQUE	69
II.A <i>Définition d'un objectif de recherche</i>	69
II.B <i>Choix d'un positionnement méthodologique</i>	69
II.C <i>Construction d'un itinéraire de recherche</i>	70
TROISIÈME CHAPITRE : DÉVELOPPEMENT DU LANGAGE DE MODÉLISATION ISI-SYSTEMA	73
I. RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE ORIENTÉE	74
I.A <i>Définition de critères de sélection dans la bibliographie</i>	74
I.B <i>Étude comparative des langages retenus</i>	75
II. DESCRIPTION DU LANGAGE ISI-SYSTEMA.....	76
II.A <i>Origines du langage ISI-Systema</i>	76
II.B <i>Définitions préalables</i>	76
II.C <i>Découpage de l'activité en cinq processus élémentaires</i>	77
II.D <i>Représentation graphique basée sur des symboles</i>	78
II.E <i>Synthèse</i>	82
III. ILLUSTRATION DES POSSIBILITÉS DESCRIPTIVES DU LANGAGE POUR LA SÉCURITÉ INCENDIE	82
III.A <i>Rappel : qu'est-ce que le langage doit pouvoir représenter pour construire une trame ?</i>	83
III.B <i>Extension du feu et mouvement de la fumée dans un bâtiment</i>	83
III.C <i>Comportement humain</i>	86
III.D <i>Système technique de sécurité</i>	94
III.E <i>Effets des sources de danger sur les cibles</i>	97
III.F <i>Synthèse</i>	99

IV.	DÉMARCHE DE CONSTRUCTION D'UNE TRAME AVEC LE LANGAGE ISI-SYSTEMA	100
IV.A	Présentation générale de la démarche.....	100
IV.B	Recherche des interactions entre événements.....	101
IV.C	Construction et analyse des séquences d'événements possibles dans une trame	104
IV.D	Vérification des séquences et expression des contraintes de séquençage	107
QUATRIÈME CHAPITRE : ÉLABORATION DE LA DÉMARCHE DE TRADUCTION D'UN MODÈLE SYSTÉMIQUE EN RÉSEAUX DE PETRI		109
I.	IDENTIFICATION DES RÉSEAUX ÉLÉMENTAIRES À CRÉER	110
II.	EXEMPLES DE RÉSEAUX DE PETRI ÉLÉMENTAIRES CONSTRUITS À PARTIR D'UN MODÈLE SYSTÉMIQUE	110
II.A	Extraits du modèle systémique concernant ces exemples.....	111
II.B	Réseau de Petri élémentaire représentant le ferme-porte.....	113
II.C	Réseau de Petri élémentaire représentant l'occupant	115
II.D	Réseau de Petri élémentaire représentant la porte	117
II.E	Enseignements de ces trois exemples.....	120
III.	PARALLÈLE ENTRE LE MODÈLE SYSTÉMIQUE ET LES DIFFÉRENTES PARTIES D'UN RÉSEAU DE PETRI ÉLÉMENTAIRE	122
III.A	Partie représentant le déplacement de l'objet.....	122
III.B	Partie représentant le rôle de l'objet dans la propagation de l'alerte	122
III.C	Partie(s) représentant une action de l'objet sur les autres objets.....	123
III.D	Partie(s) représentant les interactions continues de l'objet avec le modèle aéraulique	123
III.E	Partie représentant la dégradation de l'objet.....	124
IV.	PRÉSENTATION DE LA DÉMARCHE DE CONSTRUCTION	125
IV.A	Présentation générale de la démarche de construction.....	125
IV.B	Illustration de la démarche de construction sur l'exemple du ferme-porte	127
CINQUIÈME CHAPITRE : APPLICATION PRATIQUE.....		133
I.	SÉLECTION DE L'APPLICATION	133
II.	ANALYSE PRÉALABLE	133
II.A	Constitution d'un groupe de travail et définition du cadre de l'étude.....	133
II.B	Définition de l'objet de l'étude	134
II.C	Définition des objectifs à atteindre et des événements non souhaités	137
II.D	Sélection de mesures correctives à évaluer et construction de stratégies de sécurité	139
III.	CONSTRUCTION DE LA TRAME PAR LE GROUPE DE TRAVAIL À L'AIDE DU LANGAGE ISI-SYSTEMA.....	140
III.A	Définition des échanges potentiels de masse et d'énergie.....	140
III.B	Définition des propagations potentielles de l'alerte	144
III.C	Définition des déplacements potentiels de personnes	146
III.D	Définition de l'ensemble des événements du système	147
III.E	Vérification de la trame.....	156
IV.	TRADUCTION DE LA TRAME EN RÉSEAUX DE PETRI ET SIMULATIONS	164
IV.A	Réseaux de Petri générés	164
IV.B	Exemple détaillé d'un réseau élémentaire : le premier foyer	165
IV.C	Retour d'expérience sur la démarche de traduction	169
IV.D	Simulation des scénarios et recherche de situations de danger dans les scénarios	169
V.	EXEMPLES DE RÉSULTATS	169
V.A	Utilisation de la fréquence d'occurrence des E.N.S. par stratégie.....	170
V.B	Utilisation des histogrammes temporels d'occurrence des E.N.S.....	172
V.C	Synthèse	175
CONCLUSION ET PERSPECTIVES.....		177
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES		179
ANNEXES.....		185
ANNEXE 1: MODÈLE PHYSIQUE CIFI 2009		187
ANNEXE 2: PRÉSENTATION DÉTAILLÉE DE LA DÉMARCHE DE CONSTRUCTION DE RÉSEAUX DE PETRI		195

ANNEXE 3: QUELQUES RÉSEAUX DE PETRI DE L'APPLICATION PRATIQUE	225
INDEX	233
LISTE DES ILLUSTRATIONS.....	233
GLOSSAIRE	236

INTRODUCTION

Le présent travail s'inscrit dans le champ de la sécurité incendie dans les bâtiments. La sécurité incendie repose sur un ensemble de mesures de mise en sécurité incendie, de nature aussi bien technique (p. ex. : une installation de détection) qu'organisationnelle (p. ex. : procédures d'évacuation). Un ensemble de mesures en interactions définit une stratégie de sécurité incendie. Aujourd'hui en France, le choix des stratégies de sécurité incendie à mettre en œuvre dans un bâtiment est fortement réglementé, et dépend à la fois du type de l'ouvrage en présence (p. ex. : bâtiment d'habitation, établissement recevant du public, bâtiment industriel etc.) et de sa taille (p. ex. : supérette ou centre commercial). Toutefois, dans certaines circonstances exceptionnelles (p. ex. : ouvrages d'art, réhabilitation de bâtiments anciens, bâtiments hors normes), la mise en place des mesures réglementaires peut s'avérer techniquement ou financièrement délicate. Le recours à une étude d'ingénierie en sécurité incendie est alors envisageable. L'objectif d'une telle étude est de proposer des mesures de sécurité compensatoires, alternatives aux mesures réglementaires. Sachant qu'une mesure compensatoire n'est acceptable qu'à la condition que sa mise en œuvre ne diminue pas le niveau de sécurité par rapport à la stratégie réglementaire, une étude de sécurité incendie repose sur l'analyse de la performance des différentes stratégies envisagées dans le but de les comparer. Cette analyse de performance est obtenue en calculant le risque incendie pour différentes stratégies et pour des scénarios d'incendies jugés pertinents. Les difficultés à surmonter pour réaliser une étude de sécurité incendie sont, entre autres, la sélection des scénarios à analyser, la définition de la méthode de calcul du risque, l'élaboration de critères de comparaison des stratégies et de sélection des mesures.

Pour pallier ces difficultés, certains auteurs ont mis au point des outils de simulation parmi lesquels quelques exemples reposant sur des approches similaires peuvent être cités. Tout d'abord, le centre de recherche canadien a mis au point deux outils probabilistes : « FIRECAM » (Yung, et al., 1999) et « FIERAsystem » (Bénichou, et al., 2005) servant à évaluer les systèmes de protection incendie dans les immeubles d'appartements et de bureaux pour FIRECAM et dans les bâtiments industriels de grande taille pour FIERAsystem. Le centre de recherche britannique FRS¹ a développé CRISP II (Frasel-Mitchell, 1997), un outil s'appuyant sur des simulations de Monte Carlo pour générer de multiples scénarios d'incendie. Enfin, le CSTB² a développé SCHEMA-SI, un outil qui s'appuie sur des réseaux de Petri et sur des simulations de Monte Carlo pour générer lui aussi de multiples scénarios d'incendie. Les trois outils cités reposent sur un couplage entre un modèle physique renseignant sur la propagation de l'incendie et de la fumée dans le temps et des modèles de comportement humain et de composants techniques (p. ex : détecteur, alarme, portes, fenêtre, murs, etc.). Pour cette raison, ces outils présentent un double avantage : d'une part le grand nombre de scénarios d'incendie étudiés (surtout pour CRISP II et SCHEMA-SI) et d'autre part la prise en compte simultanée de phénomènes de nature très différentes (p. ex. : la propagation du feu et de la fumée, le comportement humain, la réponse du système de sécurité, la réponse thermomécanique du bâtiment). Toutefois, pour être pleinement utilisables lors d'une étude de sécurité incendie, leur intégration dans une méthode d'analyse de risque « sur-mesure » s'avère nécessaire. Cette constatation a mené à définir le présent sujet, dont l'objectif consiste à contribuer au développement d'une méthode d'analyse spécifique à l'outil SCHEMA-SI.

¹ Fire Research Station

² Centre Scientifique et Technique du Bâtiment

Le traitement de ce problème a débuté par une réflexion sur ce que devrait être la méthode d'analyse de risque spécifique à SCHEMA-SI. Ensuite, a été entreprise la sélection justifiée d'une thématique à traiter parmi l'ensemble des tâches qu'il faudrait accomplir pour construire cette méthode, dite ici « idéale » (cf. deuxième chapitre). A ce stade, il est apparu que l'une des difficultés que la méthode doit surmonter est celle de la mise en données du problème, et ce pour deux raisons. Premièrement parce que le groupe d'acteurs menant l'étude de sécurité est amené à poser un grand nombre d'hypothèses de comportements de nature variée et fortement interconnectés, et que ces hypothèses doivent conserver une stricte cohérence d'ensemble. Deuxièmement, parce que les réseaux de Petri utilisés dans SCHEMA-SI doivent être reconstruits à chaque nouvelle étude, et que ce travail est à la fois chronophage et fastidieux. Pour résoudre ce double problème et pour des raisons détaillées dans le présent mémoire, nous avons pris le parti de définir un langage graphique de modélisation permettant au groupe de travail de réfléchir à la mise en données du problème point par point (cf. troisième chapitre). En raison du grand nombre d'hypothèses à poser, de la nature très différente des comportements à définir et de l'importance des interactions entre ces comportements, les concepts nécessaires à la construction du langage ont été cherchés dans le champ disciplinaire de la systémique. Ensuite, afin de faciliter la construction des réseaux de Petri, l'élaboration d'une démarche de traduction des modèles graphiques, obtenus avec le langage systémique, en réseaux de Petri, a été entreprise (cf. quatrième chapitre). Pour y parvenir, des approximations successives (essai/erreur) ont été utilisées. Enfin, afin de valider la méthode de modélisation, une application pratique a été réalisée (cf. cinquième chapitre).

Premier chapitre : DONNÉES THÉORIQUES ET CONTEXTUELLES NÉCESSAIRES À LA COMPRÉHENSION DU SUJET ET DE LA MANIÈRE DONT IL A ÉTÉ TRAITÉ

OBJECTIFS DU CHAPITRE :

L'objectif du présent chapitre est de présenter :

- **le risque incendie**, dont la maîtrise passe par la compréhension de phénomènes que nous allons définir ;
- **la sécurité incendie**, qui n'est autre que la manière dont le risque incendie est maîtrisé aujourd'hui ;
- **l'outil de simulation SCHEMA-SI**, l'outil utilisé dans cette thèse pour analyser le risque incendie ;
- **les concepts et les méthodes utilisés en analyse systémique**, qui ont été empruntés pour mener à bien la présente recherche doctorale.

I. LE RISQUE INCENDIE

Un incendie désigne une réaction de combustion non maîtrisée dans l'espace et dans le temps. Un incendie peut se produire aussi bien en milieu naturel (p. ex. : dans la forêt) qu'en milieu anthropique (p. ex. : en ville). La présente recherche doctorale se limite aux incendies dans les bâtiments, c'est-à-dire en milieu anthropique.

Le présent paragraphe a pour objectif de définir ce qu'est le risque incendie. Après un rappel sémantique, nous identifierons les dangers occasionnés par un incendie ainsi que leurs conséquences sur les cibles (la vie, les biens, le milieu naturel). Ensuite, nous balayerons quelques données statistiques afin de cerner l'ampleur du risque incendie en France, ampleur sur laquelle nous concluons. Enfin, nous présenterons le déroulement d'un incendie réel afin de mettre en évidence la complexité du problème traité.

I.A Rappel sémantique relatif à la notion de risque

Le risque (R) est défini (Perilhon, 2003) comme un concept quantitatif dont l'estimation fait intervenir les notions :

- de **fréquence d'occurrence** (F) d'un événement non souhaité, souvent appelée, par abus de langage, probabilité³ ;
- de **gravité** (G) de cet événement en termes d'ampleur des dommages causés à des cibles (également appelées « enjeux ») ;
- d'**acceptabilité** (A) de cet événement par les individus qu'il concerne.

$$R \Rightarrow f(F; G; A)$$

³ En théorie, le terme probabilité ne peut être utilisé qu'à la condition *sine qua none* d'avoir préalablement cerné Ω , l'ensemble des possibles (p. ex. : lors d'un jet de dé à 6 faces, Ω vaut six ; et si le dè n'est pas pipé, alors chaque face est équiprobable avec une probabilité de 1/6). Dans l'étude des situations accidentelles, cerner Ω est plus qu'illusoire et le terme fréquence d'occurrence devrait être utilisé préférentiellement.

Remarque :

Les termes R, F, G et A n'étant pas de même nature, il n'est pas possible de définir le risque R comme étant égal à une quelconque convolution des trois autres.

Un **événement non souhaité** (ou « **événement redouté** »), noté E.N.S., se définit alors comme un événement ayant un impact destructeur sur l'un ou plusieurs **enjeux** à protéger. Un E.N.S. est d'autant plus fréquent que les **facteurs de risques** sont importants. La notion de facteur de risque trouve son origine dans le domaine de la médecine et englobe aujourd'hui toutes les caractéristiques d'une entité entraînant une augmentation du risque pour elle ou pour les autres entités en présence. Perilhon, quant à lui, parle de **source de danger** pour désigner le facteur de risque. Il parle également de **flux de danger** pour désigner le support par lequel la source de danger atteint et dégrade la cible du danger. Enfin, le terme **danger** exprime la potentialité d'un système à produire un ou plusieurs E.N.S. qui ont été identifiés plus ou moins objectivement. Ce terme de danger est un concept qualitatif.

La terminologie de (Perilhon, 2003) sera reprise tout au long de ce mémoire pour sa clarté.

I.B Les principales sources de danger liées au feu

Le feu présente un danger pour des cibles telles que les individus présents sur les lieux (p. ex. : les occupants d'un bâtiment, les sapeurs-pompiers, les promeneurs dans une forêt, etc.), les biens, le patrimoine (p. ex. : un bâtiment, son contenu et son équipement, les moyens de secours, etc.), l'activité commerciale (p. ex. : l'exploitation des forêts, la capacité d'accueil d'un hôtel, le travail fourni dans des bureaux, etc.) et le milieu naturel (p. ex. : la forêt, les sols, l'air, etc.).

Le tableau suivant récapitule de manière grossière les sources, les flux et les cibles de danger pour un feu dans un bâtiment sur les personnes et les biens (seules cibles étudiées dans la présente thèse).

Cible	Flux	Source	Commentaire
Personnes	Rayonnement thermique	Flamme, objets solides chauds, gaz chauds	Des courbes {éclairage énergétique-durée d'exposition} ⁴ ou {sensation de douleur-éclairage énergétique} ⁵ ont été définies
Personnes	Convection, conduction	Flamme, objets solides chauds, gaz chauds	La température du gaz est un facteur important d'échange avec la peau. Des courbes {température-durée d'exposition} ⁶ ont été définies. Toutefois, les seuils supportables sont très dépendants de l'individu (son âge, son stress, etc.) et du taux d'humidité du gaz
Personnes	Flux thermique (gaz inhalé)	Gaz chauds	L'inhalation de gaz chauds peut provoquer un œdème pulmonaire léthal. Les seuils sont assez similaires à ceux cités ci-dessus à ceci près que la toxicité des gaz inhalés ajoute un facteur de risque considérable
Personnes	Fumée	Gaz	La perte de visibilité peut désorienter, stresser et être un verrou à l'évacuation. Le taux d'humidité du gaz impacte la visibilité par diffusion de la lumière. Des relations simples permettant de calculer la distance de visibilité peuvent être utilisées en sécurité incendie ⁷ .

⁴ (Mudan, et al., 1988)

⁵ (Bukowski, et al., 1989)

⁶ (Bukowski, et al., 1989)

⁷ (Bukowski, et al., 1989)

Cible	Flux	Source	Commentaire
Personnes	Composition du gaz inhalé	Gaz	Les effets toxiques sont liés : - à la déplétion de l'oxygène (asphyxie si la fraction molaire est <10 %) ; - au dioxyde de carbone (accélère le rythme respiratoire et donc potentiellement l'inhalation d'autres molécules plus toxiques) ; - au <u>monoxyde de carbone</u>⁸ (association irréversible avec l'hémoglobine en carbohémoglobine et asphyxie) ; - aux autres gaz (acide chlorhydrique et cyanhydrique, dioxyde de soufre, oxyde et dioxyde d'azote, etc.) ; - aux suies (encombrement des poumons et effets potentiellement toxiques liés à leur composition) ; - à la teneur en humidité, qui rend l'air plus gênant à respirer.
Personnes	Angoisse, comportement non contrôlés	Personnes	En cas d'angoisse, les individus peuvent générer des situations dangereuses pour eux-mêmes ou pour les autres personnes. On notera par exemple que : - une évacuation dans la panique peut causer des blessures et des morts par compression et écrasement ; - des individus angoissés peuvent choisir des options dangereuses comme emprunter un escalier enfumé ou sauter par une fenêtre au lieu d'attendre les secours derrière une porte fermée. Pour être perçu comme sûr, il est préférable de ne pas fournir d'informations angoissantes mais donner des consignes de façon neutre, de ne pas alimenter la crainte du confinement, et de prendre en charge l'évacuation.⁹
Structure du bâtiment	Flux thermique	Flamme, objets solides chauds, gaz chauds	L'élévation de température dans un élément de structure peut causer des dilations et des déformations entraînant des contraintes mécaniques supplémentaires, une dégradation des caractéristiques mécaniques des matériaux ou encore une perte de la stabilité du matériau (p. ex. : éclatement du béton, rupture de l'acier).
Contenu des bâtiments	Flux thermique	Flamme, objets solides chauds, gaz chauds	Sous l'effet de la chaleur, les biens peuvent : - subir une pyrolyse et participer à la combustion ; - se liquéfier, se rompre, etc.
Contenu et structure des bâtiments	Composition du gaz avoisinant	Gaz	Les biens de nature métallique peuvent être corrodés par les gaz acides issus de la pyrolyse et de la combustion (acide chlorhydrique, oxyde d'azote, de soufre, etc.).

TABLEAU 1 : PRINCIPALES SOURCES DE DANGER POUR LES PERSONNES ET LES BIENS LORS D'UN FEU DANS UN BÂTIMENT

I.C Quelques statistiques concernant les dommages causés par le feu

Interventions en France en 2009

⁸ Le CO est responsable de plus de la moitié des décès liés au feu selon (Curtat, 2002)

⁹ (Assurance et progrès, 1992)

Chaque année, la DSC¹⁰ publie sur le site internet du ministère de l'intérieur, les statistiques d'interventions des SIS¹¹ (DSC, 2009). En 2009, les sapeurs-pompiers ont réalisées 312 119 interventions pour des incendies, soit un ratio de 8% par rapport au nombre total d'interventions. Ce ratio fait du **risque incendie un risque moyennement fréquent**.

La répartition de ces interventions pour incendie est synthétisée dans la Figure 1, déduite de (DSC, 2009). **Les feux d'habitation ont été les plus fréquents en 2009 (27,6% des incendies)**. Les feux de véhicule, ainsi que les feux sur la voie publique représentent respectivement 19,7% et 17,5%. Les feux de végétation, quant à eux, représentent 15,6%. Les feux d'entrepôts et de locaux industriels représentent 14,3% tandis que les interventions **dans les ERP**¹² **représentent seulement 2,4%** (tous types d'ERP confondus). Les autres types de feu (locaux agricoles et artisanaux) sont peu fréquents.

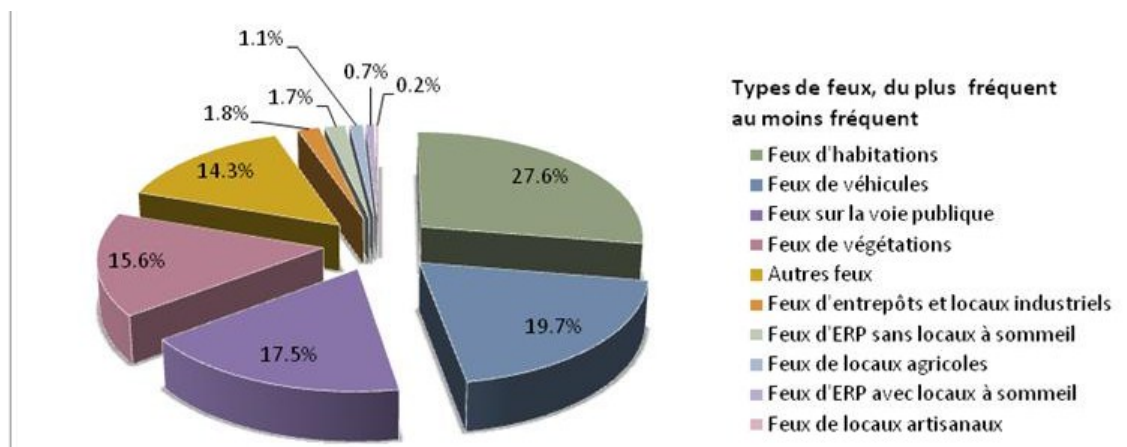


FIGURE 1 : RÉPARTITION DES INCENDIES EN FRANCE, POUR L'ANNÉE 2009

Les pertes en vie en 2006

Les données recueillies ont trois origines :

- les statistiques d'interventions des services d'incendie et de secours éditées par la DSC (DSC, 2009) ;
- les statistiques du CÉPIDC¹³ de l'INSERM¹⁴, regroupées et traitées dans une publication de l'INVS¹⁵ (INVS, 2010) ;
- les statistiques de la Geneva Association, un groupe de réflexion sur l'industrie des assurances (The Geneva Association, 2009).

Les résultats sont regroupés dans le tableau suivant :

¹⁰ DSC est l'acronyme de Direction de la Sécurité Civile

¹¹ SIS est l'acronyme de Services d'Incendie et de Secours. Les SIS sont au nombre de 98 en France (DOM-TOM inclus) et sont composés de 96 services civils départementaux (des établissements publics administratifs) et de deux corps militaires, la brigade de sapeurs-pompiers de Paris (BSPP) et le bataillon de marin-pompiers de Marseille (BMPM).

¹² ERP est l'acronyme d'Établissement Recevant du Public

¹³ CÉPIDC est l'acronyme de Centre d'Épidémiologie sur les causes médicales de Décès

¹⁴ INSERM est l'acronyme d'Institut Nationale de Santé et de Recherche Médicale

¹⁵ INVS est l'acronyme d'Institut National de Veille Sanitaire

Sources de données	SIS	CÉPIDC	Geneva Association
Nombre de décès [en Homme/an]	341	496	620

Des différences considérables sont à noter.

Tout d'abord, les SIS semblent sous-estimer le nombre de morts, et ce pour trois raisons. Premièrement, car l'état des victimes s'apprécie au moment de l'intervention, et certaines peuvent perdre la vie ultérieurement des suites de leurs blessures. Deuxièmement car les statistiques fournies n'intègrent pas systématiquement les résultats des 98 SIS, comme le stipule Bernard Hognon dans son rapport pour le ministère de l'Emploi, de la Cohésion Sociale et du Logement (Hognon, 2007 pp. 15-18). Troisièmement, car certaines victimes peuvent passer inaperçues si les dégâts sont considérables et si le nombre de personnes initialement présentes sur les lieux du sinistre est inconnu.

Ensuite, les données du CÉPIDC, quoique supérieures à celles des SIS, restent néanmoins inférieures à celles de la Geneva Association. Cet écart à deux explications potentielles. La première est que les données du CÉPIDC ne regroupent que les décès survenus dans le cadre de la vie courante et font donc abstraction des décès relatifs aux incendies sur les lieux de travail ou liés aux accidents technologiques. La seconde est que la Geneva Association applique un correctif sur ses données, pour prendre en compte les décès inconnus des services de secours et des hôpitaux. En conséquent, les données de la Geneva Association sont des estimations dont la qualité n'est pas vérifiable, le correctif appliqué n'étant pas expliqué.

Il en découle qu'une confrontation entre ces valeurs n'est pas judicieuse mais que le nombre de décès en France, toute type d'incendie confondu, se situe entre 496 et 620 personnes pour l'année 2006.

Toutefois, ces trois publications permettent de déduire :

- **que l'incendie est un risque peu meurtrier en comparaison des autres risques (CÉPIDC et SIS) puisqu'il ne représente que 2% des décès accidentels de la vie courante ;**
- **que les feux d'habitation font plus de victimes que les autres feux (SIS) ;**
- **que lorsque la cause est connue, les décès sont liés à 53% à des brûlures et à 45% à des effets toxiques (CÉPIDC) ;**
- **que près de la moitié des personnes décédées des suites d'un incendie dans la vie courante avait entre 25 et 64 ans (CÉPIDC) ;**
- **que l'incendie est la troisième cause de mortalité chez les enfants de moins de 14 ans, après les noyades et les suffocations (CÉPIDC) ;**
- **que le risque incendie est légèrement plus faible en France que pour la moyenne des pays européens (1,02 décès pour 100 000 personnes contre 1,12 de moyenne en Europe) (Geneva Association).**

Les pertes en biens

Les dégâts subis par les biens mobiliers et immobiliers lors d'un incendie peuvent être considérables. Ces dégâts, dits pertes directes, sont tant occasionnés par l'incendie que par la lutte qu'il occasionne. En effet, le déploiement des secours, l'utilisation, parfois massive, de moyens d'extinction peuvent causer des dommages (p. ex. : bris des vitrages, enfouissement des portes lors de l'intervention, effet fortement abrasif des poudres d'extinction, etc.). Selon (The Geneva Association, 2009), les pertes directes liées aux incendies ont représenté **0,19% du PIB Français en 2006, soit un montant de 3 350 M€/an.**

En outre, un incendie s'accompagne souvent de dégâts moins quantifiables mais non moins conséquents tels que les pertes de données, de patrimoine, d'exploitation ou d'activité. De ce fait, un incendie peut se solder par la fermeture définitive du site et le licenciement éventuels des personnes qu'il faisait financièrement vivre. De plus, un incendie peut également engendrer des pertes culturelles et symboliques irrémédiables (p. ex. : incendie de la bibliothèque de l'académie de Sciences de Saint-Petersbourg en 1998 ou l'incendie du World Trade Center en 2001). Ces pertes correspondent à des pertes indirectes, qui viennent s'ajouter aux pertes directes.

Cependant, en comparaison avec les autres risques (p. ex. : les accidents sur la voie publique), **le risque incendie n'est pas un risque qui occasionne des dégâts matériels importants** (The Geneva Association, 2009).

Synthèse et conclusion

En conclusion, l'incendie n'est ni particulièrement meurtrier, ni particulièrement coûteux, ni particulièrement fréquent. Ainsi, les composantes G (gravité) et F (fréquence d'occurrence) du risque incendie sont faibles. Toutefois, la culture du risque incendie est forte en occident (notamment dans les pays anglo-saxons) par exemple, puisqu'il est très encadré par la réglementation. À mon sens, deux hypothèses peuvent être émises pour expliquer les raisons d'un tel intérêt pour le risque incendie. La première est que le risque incendie demeure un risque important, non pas par sa gravité ou sa fréquence, mais par sa faible acceptabilité par l'homme (composante A du risque). Les raisons de cette faible acceptabilité sont difficiles à identifier de manière rigoureuse, puisque l'acceptabilité du risque est une notion fortement subjective. La seconde est que la mise en place d'installations de sécurité incendie dans les bâtiments génère un marché suffisamment lucratif pour justifier l'implémentation d'une telle culture du risque.

I.D Exemple de déroulement d'incendie

Un article récent propose l'analyse du déroulement d'un sinistre (*Face Au Risque, numéro 49, janvier 2009*), dont quelques extraits sont repris ici.

« Il est 19h08 lorsque les pompiers reçoivent le premier appel émanant d'une infirmière du service. Le message est précis : « Feu au deuxième étage, dans une réserve, qui se propage au service de médecine ». Une dizaine de minutes plus tard, à l'arrivée des secours, le transfert horizontal des patients en zone de sécurité est en cours et l'on constate un embouteillage de lits de patients regroupés à proximité de l'escalier encloisonné. Certains sont déjà en cours de descente vers le premier étage où un point de regroupement a été défini. 19h23 « Feu de chambre au deuxième étage, nombreuses victimes intoxiquées, reconnaissance des chambres du secteur en cours.(...) Outre le local lingerie, lieu de départ du feu, le couloir est fortement dégradé sur une douzaine de mètres par la chaleur et les fumées, les faux plafonds se sont démantelés. À 20h29, le feu est éteint. (...) Au moment du sinistre, trois personnels soignants sont présents au deuxième étage et autant au premier. Le détecteur de fumée le plus proche de la lingerie se situe dans le couloir à environ trois mètres de la porte. Il s'active à 19h05 et entraîne la fermeture des portes coupe-feu isolant les deux zones protégées de l'étage, le déverrouillage de la porte de secours, l'alarme restreinte lumineuse près du local infirmier au premier étage et l'appel sur leur portable des personnels du bâtiment. Le local concerné est identifié par une infirmière qui alerte les secours trois minutes

après. Une abondante fumée s'échappe du local. L'ensemble du personnel présent et quelques visiteurs entament le transfert horizontal des patients vers la zone protégée, tandis que l'un des visiteurs tente d'employer un RIA¹⁶, abandonné après que la lance se soit détachée du tuyau. Feu et fumées se développent. Mais la montée en température et l'enfumage de plus en plus dense ne permettent pas de poursuivre ... »

A la lecture de cet extrait, il apparaît que le **déroulement** au cours du temps **de l'opération** dans l'espace concerné a reposé sur un **ensemble de mesures techniques et humaines en interactions**. En effet, la mise en sécurité des occupants de cet établissement de soin a reposé, de façon concomitante, sur le fonctionnement d'équipements de sécurité (le détecteur de la circulation, la fermeture des portes de recoupement de la circulation, l'alarme lumineuse, le téléphone portable) ainsi que sur des actions humaines (le personnel soignant appelle les secours, procède au transfert horizontal des occupants, les visiteurs apportent une aide, les pompiers portent secours et éteignent le feu).

Le présent travail part du constat que **le succès d'une mise en sécurité** des occupants d'un établissement repose sur **l'interdépendance entre les équipements, les modes d'organisation, l'homme et les phénomènes physiques du feu**. Une méthode dont l'ambition vise la modélisation de la mise en sécurité des occupants lors d'un sinistre doit être en mesure d'**appréhender cette interdépendance**. La sécurité incendie fait par ailleurs l'objet du paragraphe suivant.

II. LA SÉCURITÉ INCENDIE

La sécurité incendie est la branche de la sécurité visant à diminuer le risque incendie. Pour y parvenir, la sécurité incendie s'appuie sur la **mise en place de mesures de prévention et de protection**, appelées plus globalement mesures de sécurité. Quelques mesures de sécurité sont détaillées au paragraphe II.C.

En France, le choix des mesures de sécurité à mettre en place est fondé sur la réglementation. Cette réglementation s'appuie sur deux grandes approches :

- une **approche prescriptive**, détaillée au paragraphe II.A et consistant à choisir et à dimensionner des mesures en suivant des prescriptions réglementaires préétablies ;
- une approche performancielle visant à dimensionner les mesures en ayant recours à la simulation numérique. Cette dernière approche correspond à une application de **l'Ingénierie de la Sécurité Incendie (ISI)**, expliquée et détaillée au paragraphe II.B.

II.A Réglementation prescriptive française

La réglementation prescriptive est un ensemble de règles de droit, qui a été créée par retouches successives du législateur au fur et à mesure des avis d'experts, des retours d'expériences et de l'essor du droit communautaire. La réglementation prescriptive donne, comme son nom l'indique, un ensemble de prescriptions à observer pour assurer la sécurité incendie. Lors d'une analyse du risque incendie ou d'une intervention sur ces bâtiments dans le cadre d'une mise en sécurité, il est **indispensable de connaître la date exacte du dépôt du permis de construire**,

¹⁶ RIA est l'acronyme de Robinet d'Incendie Armé

afin de se **situer dans le contexte réglementaire initial, en vigueur au moment de la construction.**

II.A.a) Les principaux textes réglementaires

Le tableau suivant, issu de (Cocco, et al., 2004), regroupe les textes en vigueur au 31 Mars 2004. Depuis 2004, certains textes ont probablement évolués.

Type de bâtiments	Textes de base (lois, décrets, codes)	Textes réglementaires
Établissement recevant du public (ERP)	Code de la construction et de l'habitation – chapitre 3 : protection contre les risques d'incendie et de panique dans les immeubles recevant du public (articles L123-1 à L. 123-3, articles R. 123-1 à R 123-55) modifiés par : - décret 78-1296 du 21 décembre 1978 - loi 83-440 du 2 juin 1983	Arrêté du 25 juin 1980 relatif au règlement de sécurité contre les risques d'incendie et de panique dans les ERP, modifié et complété par : - arrêté du 22 juin 1980 - arrêté du 21 novembre 2002 - arrêté du 14 février 2003
Immeuble de grande hauteur (IGH)	Code de la construction et de l'habitation – chapitre 2 : dispositions de sécurité relatives aux immeubles de grande hauteur (articles R. 122-1 à R 122-29) modifiés par : - décret 83-1261 du 30 décembre 1983 - loi 83-440 du 2 juin 1983	Circulaire du 7 juin 1974 relative au désenfumage dans les IGH Arrêté du 18 octobre 1977 approuvant le règlement de sécurité pour la construction des immeuble de grande hauteur et leur protection contre les risques d'incendie et de panique, modifié par : - arrêté du 22 octobre 1982 - arrêté du 16 juillet 1992
Habitations	Code de la construction et de l'habitation – chapitre 1 : règles générales (articles R. 111-1 à R 111-19-11)	Arrêté du 31 janvier 1986 relatif à la protection contre l'incendie des bâtiments d'habitation, modifié par : - arrêté du 18 août 1986 - arrêté du 19 décembre 1988
Bureaux – activités	Code du travail - chapitre 2 : prévention des incendie et des explosions – évacuation (articles R. 232-12 à R 232-12-29)	Arrêté du 5 août 1992 fixant des dispositions pour la prévention des incendie et le désenfumage de certains lieux de travail modifié par : - arrêté du 22 septembre 1995 - arrêté du 10 septembre 1998 - circulaire DRT 95-07 du 14 avril 1995

Type de bâtiments	Textes de base (lois, décrets, codes)	Textes réglementaires
Installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE)	Code de l'environnement – Livre 5 : prévention des pollutions, des risques et des nuisances – titre 1 : installations classées pour la protection de l'environnement (articles L. 551-1 à L. 517-2)	Décret 77-1133 du 21 septembre 1977 pris pour l'application de la loi relative aux installations classées pour la protection de l'environnement, modifié par : - décret 2002-235 - décret 2002-89 - décret 2001-146 - décret 200-258 - décret 96-18 - décret 94-484 - décret 88-199

II.A.b) Les principes généraux de la mise en sécurité incendie

Les textes et la rétroactivité

Lors de l'aménagement de l'ensemble des locaux d'un établissement ou lors de la création d'une nouvelle activité dans un bâtiment existant, les dispositions du règlement concernant cette activité sont applicables.

Le règlement en vigueur qui vise les bâtiments neufs ne s'applique pas aux établissements existants. En revanche, lorsque des travaux de remplacement, d'aménagement ou d'agrandissement sont entrepris dans ces établissements, les dispositions du règlement actuellement en vigueur sont applicables aux seules parties de la construction ou des installations modifiées. En outre, si les modifications ont pour effet d'accroître le risque de l'ensemble de l'établissement, alors de mesures de sécurité complémentaires peuvent être imposées.

En définitive, les difficultés d'application des textes sont :

- le principe de non rétroactivité ;
- la date du dépôt du permis de construire conditionne le texte à appliquer ;
- en cas de travaux, les nouveaux textes ne s'appliquent qu'aux parties concernées.

La mise en conformité et la mise en sécurité

Lorsqu'il est constaté que la construction est réalisée conformément aux attentes du permis de construire, l'ouvrage est déclaré conforme et un certificat de conformité est délivré. Pour les ERP, la commission de sécurité doit donner son avis sur la délivrance dudit certificat avant l'ouverture au public. Des visites périodiques veillent à la conformité dans le temps.

Un ouvrage déclaré conforme le reste tant que d'autres travaux ne sont pas entrepris. Lorsque des travaux sont engagés, l'ouvrage doit subir une mise en sécurité (correspondant à une mise en conformité avec les textes en vigueur au moment des travaux).

Les principes incontournables lors de la réalisation de travaux

Lorsqu'il s'agit d'adapter les règles de sécurité, quatre principes sont incontournables et se complètent. Ces principes sont listés ci-après :

- les dispositions du Règlement de sécurité ne s'appliquent qu'aux seules parties concernées par les travaux ;

- les travaux envisagés ne peuvent avoir pour conséquence de diminuer le niveau de sécurité du bâtiment ;
- les travaux prévus doivent respecter les dispositions du Règlement de sécurité. S'il y a impossibilité architecturale de respecter le règlement, le maître d'ouvrage doit alors adresser une demande écrite justifiée à l'autorité compétente expliquant les atténuations demandées. Parallèlement, il doit proposer des mesures qu'il compte prendre pour compenser les atténuations sollicitées. Ces mesures portent le nom de mesures compensatoires ;
- les atténuations sollicitées ne peuvent en aucune façon porter sur le nombre et la largeur des dégagements.

Remarque : exemple de mesures compensatoires

- création de dégagements supplémentaires ou plus importants ;
- installation d'un réseau fixe de détection ou d'extinction automatique ;
- mise en place d'un service de sécurité ;
- limitation de l'effectif du public reçu ;
- mise en place de dispositions permettant de ralentir la propagation du feu ;
- etc.

L'analyse des risques liées à un bâtiment donné

Afin de vérifier la conformité d'un établissement ou d'estimer si des travaux ne diminuent pas le niveau de sécurité, il convient de procéder à une analyse des risques. Cette analyse porte à la fois sur le feu, le comportement humain et les moyens de lutte contre l'incendie. L'analyse revêt un caractère de « check-up », établi lors d'une visite approfondie. Son but est de :

- relever les infractions aux différentes réglementations applicables en matière de sécurité ;
- déceler tout ce qui peut être à l'origine d'un feu, d'une explosion ou d'un mouvement de panique ;
- rechercher les éléments de propagation de sinistre ;
- proposer des solutions pour pallier les anomalies ou les infractions relevées.

Des méthodes pour réaliser cette analyse de risque ont été proposées, notamment par (Cocco, et al., 2004) et par (Chorier, 2007). La première méthode s'appuie sur des grilles de diagnostic à remplir qualitativement (bon, moyen, mauvais) tandis que la seconde recourt à des outils de simulations numériques et d'aide à la décision (cf. IV.C.e).

Les interlocuteurs institutionnels privilégiés

Les principaux acteurs en matière de sécurité incendie sont :

- **les sapeurs-pompiers**, sollicités pour une intervention en cas de sinistre, pour la vérification des moyens de secours ou pour dispenser des conseils en matière de prévention ;
- **le maire**, sollicité lors des demandes de permis de construire, d'autorisation de travaux, d'ouverture, de délivrance du certificat de conformité, etc. ;
- **l'inspecteur du travail**, sollicité lorsqu'il s'agit de bâtiment soumis au code du travail ;
- **les fonctionnaires du ministère de l'Équipement**, sollicités lors de la vérification des règles d'urbanisme et lors de la délivrance du certificat de conformité ;

- **l'inspecteur des installations classées**, sollicité si l'établissement est une ICPE¹⁷.

II.B Ingénierie de la sécurité incendie (ISI)

L'ingénierie de la sécurité incendie (ISI) a vu le jour il y a un peu plus de 15 ans. Elle correspond à l'émergence, aux États-Unis, et dans quelques autres pays, essentiellement anglo-saxons, d'une doctrine fondée sur une approche performancielle de la sécurité incendie, c'est-à-dire une approche caractérisée par la volonté de **quantifier** le risque incendie et la performance d'une installation de sécurité.

L'ISI est entrée dans les mœurs de la législation française avec deux arrêtés du 22 mars 2004 autorisant le recours à l'ingénierie pour le désenfumage ainsi que pour la résistance au feu de la structure d'un bâtiment. **En France, son utilisation est donc réglementée, et limitée à ces deux domaines.** Toutefois, en attendant une plus grande ouverture de la réglementation à l'ISI, des méthodes et des outils sont en cours de construction dans certains organismes de recherche comme le CSTB. Plus récemment, le programme national PN ISI, initié en 2005 et géré par l'IREX¹⁸ tente globalement de poser un cadre à l'utilisation de l'ISI.

L'ISI est guidée par l'évolution des connaissances des phénomènes mis en jeu lors d'un incendie ainsi que par l'évolution de ressources de calcul informatique. Toutefois, la modélisation de ces phénomènes est particulièrement complexe et ce pour trois raisons. Premièrement, parce qu'ils sont de natures variées (du comportement humain à la physico-chimie du feu, en passant par l'automatisme) et que les interactions qu'ils entretiennent sont nombreuses. Deuxièmement, parce que ces phénomènes, notamment ceux relatifs au comportement humain et aux situations accidentelles, sont entachés d'incertitude. Ces incertitudes sont tant liées au manque de données qu'à l'impossibilité (notamment pour des raisons éthiques) de réaliser des expériences en conditions réelles. Troisièmement, parce que force est de constater qu'en admettant l'unicité d'un accident de même que celle d'un individu, il devient illusoire d'espérer les cerner parfaitement *a priori*. Il en découle que l'ingénieur en sécurité incendie doit faire face à des situations complexes, imprévisibles et uniques. Pour y parvenir, différents types de modèles, implémentés et éventuellement couplés dans des outils de simulations divers, sont à sa disposition.

Après quelques généralités nécessaires pour fixer la terminologie utilisée pour différencier les modèles (II.B.a), un rapide balayage des outils de simulation proposés sera effectué (II.B.b). En dernier lieu, nous verrons comment ces outils sont intégrés dans des méthodes d'analyse de risque existantes (cf. II.B.c).

II.B.a) Généralités relatives aux différents types de modèles

D'une manière générale, plusieurs types de modèles peuvent être construits, selon les objectifs à atteindre et les informations recueillies. La Figure 2, inspirée de (Fleury, et al., 2006), propose une classification des différents types de modèles. Cette figure permet de clarifier les termes utilisés dans la présente thèse.

¹⁷ ICPE est l'acronyme d'Installation Classée pour la Protection de l'Environnement

¹⁸ IREX est l'acronyme d'Institut pour la Recherche appliquée et l'EXpérimentation en génie civil

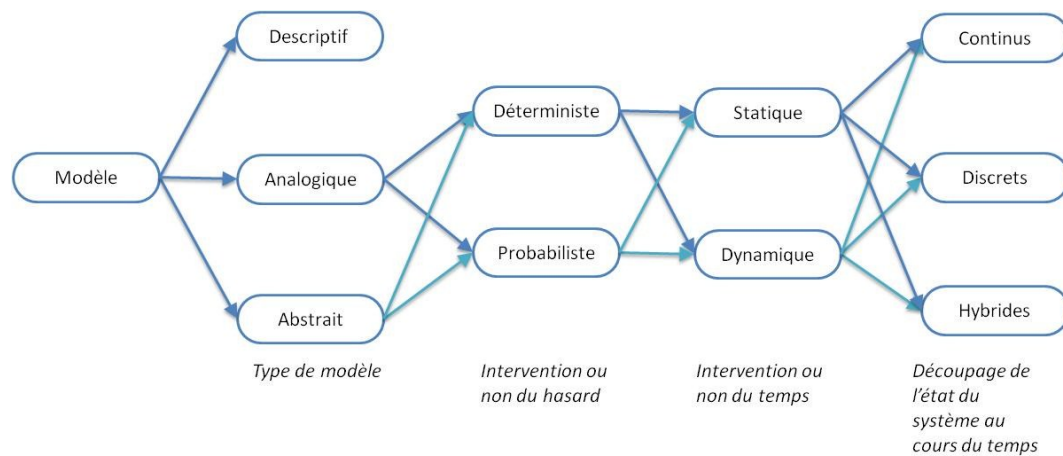


FIGURE 2 : CLASSIFICATION DES DIFFÉRENTS TYPES DE MODÈLES

Trois types de modèles peuvent être distingués : les **modèles descriptifs** constitués de texte, les **modèles analogiques** qui imitent le système représenté (p. ex. : un modèle physique, une maquette) et les **modèle abstraits**, qui représentent le système par une série de symboles auxquels un sens est associé (p. ex. : des symboles mathématiques, des ronds, des traits, couleurs, etc.). En parallèle, l'état du système peut varier ou non dans le temps (statique ou dynamique), peut dépendre du hasard (déterministe ou probabiliste¹⁹) et peut être représenté par des variables continues²⁰, discrètes²¹ ou les deux. Dans ce dernier cas, on parle de système hybride.

II.B.b) Quelques outils de simulation construits pour l'ISI à l'échelle internationale

Les outils s'appuyant sur un seul type de modèle

D'une part, des **modèles à dynamique continue** sont particulièrement utilisés pour représenter les phénomènes physiques et chimiques mis en jeu lors d'un incendie. Les outils qui en découlent vont de la simple formule de corrélation aux volumes finis. Les phénomènes prédits concernent en général :

- le développement du feu et le mouvement de la fumée – par exemple les outils CFAST (Peacock, et al., 2005), CIFI 2009 (Demouge, et al., 2008) et FDS (Mac Grattan, 2004);
- la réponse thermomécanique des structures – par exemple les outils SAFIR (Franssen, et al., 2004) et LENAS (Kaneka, 1990) ;
- le mouvement des personnes – par exemple les outils SEVE-P (Théos, 1994) et Exodus (Galea, et al., 2008).

Ces outils fournissent une évolution temporelle des grandeurs auxquelles on s'intéresse (température de la fumée, déformation d'une structure, débit de personnes évacuant un

¹⁹ Le terme **probabiliste** est un terme pratique pour dire qu'on modélise/simule les phénomènes à partir de variables aléatoires continues ou discrètes à valeurs (généralement) réelles. En revanche, le terme **stochastique** a une signification précise et indique qu'une variable aléatoire est associée à des *fonctions* à valeurs réelles (p. ex. : une fonction du temps ou de l'espace).

²⁰ Les variables évoluent dans un intervalle de réels et leur évolution se traduit par un système d'équations algèbro-différentielles.

²¹ Les variables évoluent dans un ensemble dénombrable et leur évolution se traduit par un changement instantané de valeur.

bâtiment, etc.). Étant déterministes, ils fournissent les mêmes résultats pour des données d'entrées identiques.

D'autre part, les **modèles probabilistes**, en rendant possibles la modélisation et la simulation de très nombreux scénarios, apparaissent adaptés pour représenter la variabilité des situations possibles. En France, quelques auteurs ont déjà envisagé d'appliquer ce type d'approche au problème spécifique de la sécurité incendie des bâtiments (Hognon, 1992),(Chabot, 1998), (Chorier, 2007), (Guyonnet, 1983). Leurs outils prennent en compte à la fois les phénomènes physiques liés au feu, des éléments de comportement humain et des mesures de sécurité. L'approche de (Guyonnet, 1983) est une approche statique fondée sur les arbres des causes (Mortureux, 2002). Les trois approches de (Hognon, 1992),(Chabot, 1998) et (Chorier, 2007) s'appuient sur les réseaux de Petri (un formalisme, plus amplement détaillé au § III.A, permettant la gestion dynamique d'événements) et reposent sur des simulations de Monte Carlo (Robert, et al., 2004). La simulation de Monte Carlo est une technique de simulation applicable aux modèles probabilistes et stochastiques. Elle permet de simuler un grand nombre de scénarios en assurant la génération de nombres aléatoires conformément à une distribution de probabilité.

Les outils s'appuyant sur plusieurs types de modèles en interaction

À ce jour, certains auteurs tentent de construire des outils faisant appel à plusieurs modèles, dits alors sous-modèles. Bien souvent, ces sous-modèles sont de types différents. De tels outils tentent d'adopter une démarche globale de la sécurité, en faisant coexister plusieurs points de vue sur une même configuration. Certains outils sont rapidement évoqués ci-après.

a) FIRECAM²² et FIERAsystem (Yung, et al., 1999), (Bénichou, et al., 2005)

Le centre de recherche canadien mis au point deux outils probabilistes : « FIRECAM » et « FIERAsystem » servant à évaluer les systèmes de protection incendie dans les immeubles d'appartements et de bureaux pour FIRECAM et dans les bâtiments industriels de grande taille pour FIERAsystem. Tous deux reposent sur l'utilisation séquentielle de sous-modèles interagissant les uns avec les autres (p. ex. : les données de sortie des uns sont utilisées en données d'entrée des autres). Chaque sous-modèle contient des équations qui décrivent l'incendie et ses effets sur l'immeuble, ses occupants et son contenu. Le logiciel renseigne ainsi sur la propagation de l'incendie et de la fumée dans le temps, sur les délais de réponse des systèmes de détection et d'extinction des incendies, sur le délai de réaction et d'évacuation des occupants ainsi que sur le comportement des éléments de l'immeuble face aux attaques de l'incendie.

b) HAZARD I (Peacock, et al., 1994)

Le NIST²³ a développé HAZARD I, un outil déterministe d'analyse de risque. HAZARD I s'appuie sur l'utilisation séquentielle de quatre sous-modèles distincts, qui échangent des données tantôt de manière automatique, tantôt de manière manuelle (selon le cas). Les quatre sous-modèles sont les suivants :

²² FIRECAM est l'acronyme de Fire Risk Evaluation and Cost Assessment Model

²³ NIST est l'acronyme de National Institut of Standards and Technology

- FAST²⁴ (Peacock, et al., 2000), un modèle de transport de masse et d'énergie un bâtiment multi-compartiments ;
- DETACT (Evans, et al., 1985), un modèle d'activation de détecteur et de sprinkler ;
- EXIT (Levin, 1987), un modèle d'évacuation des personnes ;
- TENAB (Peacock, et al., 1994), un modèle de létalité faisant intervenir la température et la toxicité des gaz.

c) PFS²⁵ (Hostikka, et al., 2003a)

Le centre de recherche finlandais VTT a développé un outil d'analyse de risque appelé « Probabilistic Fire simulator ». PFS associe le sous-modèle physique continu CFAST (Peacock, et al., 2005) avec un sous-modèle d'arbre des événements dépendant du temps. De cette manière, l'intervention des secours, les détecteurs, l'alarme, le comportement humain, etc. sont modélisés comme des événements. En outre, PFS s'appuie sur les simulations de Monte Carlo, les aspects probabilistes étant utilisés pour faire varier l'état initial de la configuration étudiée. Cet outil a été testé pour le cas d'un feu de Tunnel avec pour objectif la détermination de la probabilité de dysfonctionnement d'un composant de détection (Hostikka, et al., 2003b). Dans cette application, la probabilité de dysfonctionnement se présente sous la forme d'une fonction dépendante du temps.

d) CRISP II²⁶ (Frasel-Mitchell, 1997)

Le centre de recherche britannique FRS²⁷ a développé CRISP II, un outil permettant d'évaluer différentes mesures correctives susceptibles d'être mises en place pour améliorer la sécurité. CRISP II s'appuie sur des simulations de Monte Carlo pour générer de multiples scénarios d'incendie de A à Z. L'outil se compose d'un sous-modèle physique de zones multi-volumes (tel CFAST), d'un sous-modèle de comportement humain et de nombreux sous-modèles de comportement de composants (p. ex : détecteur, alarme, portes, fenêtre, etc.). Les sous-modèles sont exécutés simultanément (ce qui permet une interaction continue entre eux) et sont supervisés par un contrôleur de Monte Carlo. Le risque incendie s'exprime sous forme d'un nombre de décès sur le nombre total de scénarios simulés.

e) SCHEMA-SI²⁸ (Demouge, et al., 2008)

Le CSTB a développé un prototype d'outil stochastique hybride permettant d'analyser la performance de mesures correctives susceptibles d'être mises en place dans un bâtiment. En ce sens, SCHEMA-SI est très proche de CRISP II. Cet outil permet le couplage d'un modèle physique « CIFI 2009²⁹ » avec des réseaux de Petri, et génère de multiples scénarios par application de la méthode de Monte Carlo. Les réseaux de Petri sont structurés en objets, permettant de définir un sous-réseau pour chaque composant du système. L'ensemble des sous-réseaux ainsi que le sous-modèle physique sont exécutés simultanément, et sont en interaction continue. Cet outil de simulation, utilisé dans la présente recherche doctorale, est détaillé au § III.

²⁴ FAST est l'ancêtre du modèle CFAST, sans doute le modèle à deux zones gazeuses le plus connu dans le monde de l'ISI

²⁵ PFS est l'acronyme de Probabilistic Fire Simulator

²⁶ CRISP est l'acronyme de Computation of Risk Indices by Simulation Procedures

²⁷ FRS est l'acronyme de Fire Research Station

²⁸ SCHEMA-SI est l'acronyme de Stochastic Computation and Hybrid Event Modeling Approach - Sécurité Incendie

²⁹ Le modèle physique CIFI 2009 se base sur les mêmes hypothèses principales que CFAST

II.B.c) Intégration de ces outils dans des méthodes d'analyse de risque

Les outils de simulation détaillés ci-avant sont le plus souvent intégrés dans des méthodes d'analyse des risques (Villemeur, 1988). Ces méthodes sont utilisées pour identifier les risques et proposer des mesures correctives. Des exemples de méthodes spécifiques à l'incendie sont (Chorier, 2007), (DFHCM, 2005)³⁰, (PN-ISI G1, 2008).

A la lecture des méthodes citées, une démarche générique dans laquelle les outils de simulation d'incendie de l'ISI sont intégrés, peut être synthétisée comme sur la Figure 3 présentée ci-après.

Il apparaît, à la lecture de cette figure, que les outils de simulations sont utilisés à la fois pour le tri et la sélection des scénarios majorants (dans le cas des outils probabilistes) et pour l'analyse du risque incendie dans le bâtiment.

Toutefois, cette démarche générique ne s'applique pas à tous les outils puisque chaque outil requière son propre lot de données d'entrée. Par exemple, l'utilisation d'un outil déterministe oblige à sélectionner peu de scénario majorants tandis que le recours à un outil probabiliste permet d'en prendre beaucoup plus en compte. Il en découle que des méthodes d'analyse de risque spécifiques sont amenées à voir le jour.

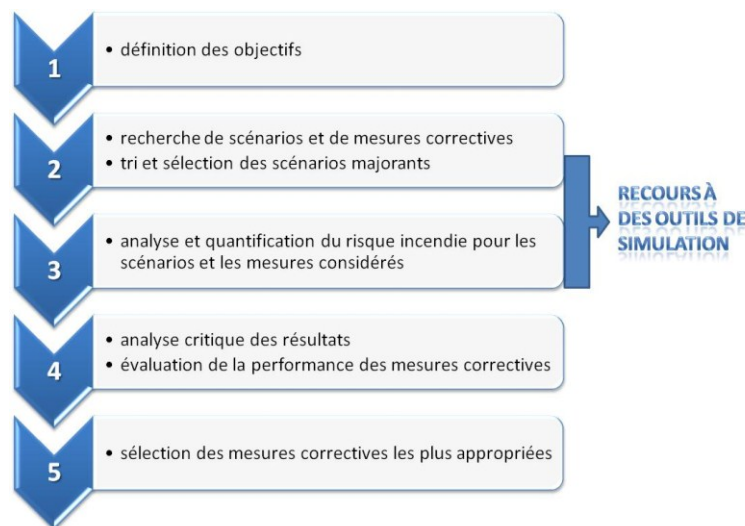


FIGURE 3 : DÉMARCHE GÉNÉRIQUE D'UNE MÉTHODE D'ANALYSE DE RISQUE EN ISI

II.C Les mesures de mise en sécurité incendie

On appelle mesure de sécurité toute mesure technique ou organisationnelle ayant pour objectif de diminuer le risque incendie. Deux types de mesures peuvent être distingués : les mesures de prévention et les mesures de protection. Les mesures de prévention visent à limiter la fréquence d'occurrence de l'incendie alors que les mesures de protection visent à en limiter la gravité.

³⁰ La méthode établie dans cette référence est connue sous le nom de FIRE-TECH. De plus, DFHCM est l'acronyme de Department of Flow, Heat and Combustion Mechanics.

La description des mesures citées ci-après est inspirée des deux ouvrages (INERIS, 2005) et (Cocco, et al., 2004).

Remarque :

La liste de mesures présentée ci-après sert à resituer le cadre de la recherche dans le domaine de la sécurité incendie et à définir les mesures utilisées dans la thèse. Elle ne saurait être exhaustive ou correspondre à une configuration réglementaire donnée. En effet, si certaines mesures font l'objet de prescriptions réglementaires, d'autres revêtent plutôt un caractère de recommandation.

II.C.a) Mesures de prévention

Consignes de sécurité

L'exploitation d'un établissement est soumise à un certain nombre de consignes de sécurité concernant l'incendie. D'une manière générale, il est recommandé que les consignes de sécurité incitent à limiter la présence de source d'inflammation.

Formation du personnel

Un personnel périodiquement sensibilisé et formé concourt à diminuer le risque incendie. Idéalement, la formation devrait couvrir :

- les risques incendie inhérents à l'activité de l'établissement ;
- la prévention contre l'incendie ;
- le comportement en cas d'incendie ;
- l'utilisation d'extincteurs ;
- le concept d'intervention ;
- le secourisme.

Lutte contre la malveillance

La malveillance constitue un facteur de risque d'occurrence de multiples départs de feu et donc un danger d'incendie aggravé. Les mesures de prévention les plus directes consistent à interdire le libre accès aux locaux notamment en dehors des heures de travail ou d'ouverture.

À titre illustratif, ces mesures peuvent consister à :

- clôturer le site sur toute sa périphérie et veiller à ce que cette clôture soit en bon état et entretenue régulièrement ;
- renforcer la sécurité aux points d'accès du bâtiment (portes, fenêtres, vasistas) ;
- prévoir un bon éclairage des abords du bâtiment pour faciliter le repérage des intrus ;
- surveiller de manière continue le site (p. ex. : par télésurveillance ou par l'implémentation d'un poste de gardiennage) ;
- limiter les accès aux locaux sensibles (p. ex. : local de contrôle) et aux vannes d'arrivée d'eau et d'électricité.

Toutefois, il convient d'avoir à l'esprit que certaines mesures préventives, notamment les premières citées ci-avant, peuvent constituer, en contrepartie, une gêne en cas d'intervention des sapeurs-pompiers, notamment hors des heures ouvrées. Ainsi, il est impératif de prendre des mesures permettant de faciliter l'accès des secours au site (p. ex. : aménager et maintenir de tout encombrement les voies d'accès).

Propreté et ordre dans l'établissement

Il est souhaitable d'éviter toute accumulation de fournitures qui pourraient entraver les allées, les chemins d'évacuation et dont l'extinction pourrait devenir problématique. De manière générale, il convient de limiter l'implantation désordonnée de matières combustibles afin de réduire les sources éventuelles d'inflammation et la propagation du sinistre à travers l'ensemble de l'établissement.

Sources d'inflammation

Il est clair que limiter les sources d'inflammation permet de réduire sensiblement le risque d'incendie. Par exemple, en terme de sécurité incendie il est recommandé :

- d'interdire strictement de fumer ;
- d'interdire l'introduction de liquides inflammables ;
- de garantir la mise à la terre des installations (p. ex. : risques liés à la foudre et à l'installation électrique) et de maintenir correctement les équipements électriques ;
- de préférer un système de chauffage central à effet indirect (à base d'eau chaude, d'air chaud ou de vapeur) à un système de chauffages électrique d'appoint ;
- d'instaurer des règles de circulation ;
- de s'assurer d'une lutte efficace contre la malveillance.

Remarque :

Des mesures complémentaires spécifiques peuvent être nécessaires pour les établissements à caractère industriel. De même, d'autres mesures doivent être proposées pour limiter le risque incendie dans le milieu naturel (p. ex. : feux de forêt).

Contrôle et maintenance des installations

Il est souhaitable d'établir des plans de contrôle et de maintenance préventive des équipements mis en œuvre, et plus particulièrement des équipements dévolus à la sécurité. Ce contrôle approfondi doit être effectué régulièrement.

II.C.b) Les mesures de protection

Emplacement de l'établissement

Le choix de l'emplacement d'un établissement constitue un élément important de sécurité. Tout d'abord, l'éloignement des autres constructions constitue une protection des tiers et de la propagation de l'incendie. Ensuite, la possibilité d'intervention rapide des secours externes et la proximité de moyens de lutte contre l'incendie (points d'eau, moyens de pompage, etc.) sont des éléments primordiaux pour déterminer l'emplacement d'un site. Enfin, le choix d'un lieu d'implantation qui soit aussi peu vulnérable que possible et/ou qui puisse facilement être aménagé pour éviter une pollution par d'éventuelles eaux d'extinction est recommandé.

Choix des matériaux et comportement au feu

Afin de limiter le risque incendie, les matériaux et les éléments de construction doivent être judicieusement choisis. Pour en permettre les choix, ils sont testés au cours de différents essais (harmonisés à l'échelle européenne) et classés en catégories. Leur comportement est étudié sous deux aspects :

- la réaction au feu : contribution en tant qu'aliment du feu lors du développement du sinistre ;
- la résistance au feu : rôle de frein à l'action et à la propagation de l'incendie.

a) Réaction au feu

Les essais de réaction au feu permettent de classer les matériaux et les produits de construction en catégories « M », conformément à la norme NF P 92-507 et en « Euroclasses », conformes à la norme NF EN 13 501-1).

Les essais prennent notamment en compte :

- l'inflammation des gaz dégagés ;
- la propagation de la combustion ;
- le dégagement de fumées ;
- la chute de gouttes enflammées ou non ;
- le pouvoir calorifique.

La réaction au feu est donc l'ensemble des phénomènes qui se manifestent à partir d'une élévation de température, et qui aboutissent à la désagrégation puis à l'inflammation des gaz dégagés par le matériau ou par le produit de construction.

b) Résistance au feu

Les éléments de construction sont essayés dans (poteaux) ou devant (murs, cloisons, planchers, etc.) des fours d'essai. Leur résistance est étudiée à l'aide de la courbe température-temps normalisée ISO 834 et de vérins destinés à reproduire les contraintes mécaniques que les éléments subissent en temps normal dans la construction. La courbe ISO 834 représente l'enveloppe moyenne de température relevée au cours d'incendies réels.

De ces essais, il ressort des informations qualitatives comme la capacité :

- de conserver une résistance mécanique suffisante pour rester en place ;
L'élément de construction est alors dit « stable au feu » ou de classe « R » selon la nomenclature européenne.
- d'être étanche aux flammes, gaz et fumées d'incendie ;
L'élément de construction est alors dit « pare-flamme » ou de classe « E ».
- d'enrayer la propagation de la chaleur ;
L'élément de construction est alors dit « coupe-feu » ou de classe « I ».

et ce pendant une certaine durée dans le four.

Remarque :

Lors d'un incendie accidentel, les performances d'un élément de construction peuvent être considérablement différentes de celles obtenues dans un four d'essai. En effet, selon la puissance, la cinétique de combustion et la position du foyer, la sollicitation thermique sur l'élément peut être très différente de celle engendrée par la courbe ISO 834 dans un four d'essai.

La résistance au feu peut être améliorée en assurant une isolation thermique des éléments par :

- isolement par badigeonnage de peintures dites intumescentes ou de vernis ignifugés ;
- par enrobage ou encoffrement (revêtement de plâtre, ciment, fibres naturelles, etc.) ;
- par refroidissement : structures irriguées, extinction automatique.

Compartimentage

Le compartimentage d'une grande cellule en cellules de tailles plus réduites est un facteur essentiel de sécurité. Outre l'intérêt de limiter le danger, cette séparation physique permet de :

- limiter les risques de propagation ;
- réduire l'énergie thermique rayonnée sur les tiers ;

Les distances de sécurité des effets thermiques diminuent quand la surface en feu diminue (les flammes sont moins hautes, le front de flamme est moins long).

- faciliter l'intervention des secours ;

Dans certains cas, les dimensions de certaines cellules sont telles que la portée des lances n'est pas suffisante pour atteindre le cœur de l'incendie.

- isoler les locaux dangereux.

Le compartimentage peut s'avérer indispensable pour séparer les locaux à fort risque de départ de feu des autres (p. ex. : local à ordures, parking, laverie, etc.).

La mise en œuvre du compartimentage peut se faire de plusieurs façons détaillées ci-après. Ces informations sont tirées de la réglementation de sécurité incendie.

a) Par des murs séparatifs coupe-feu

Les murs coupe-feu sont généralement des murs en béton armé munis de fondations plus épaisses que la normale.

b) Par des portes coupe-feu

En cas d'ouverture dans les murs séparatifs coupe-feu, les portes doivent présenter les mêmes qualités de résistance au feu que les cloisons. Idéalement, elles devraient être équipées de systèmes les maintenant fermées (p. ex. : ferme-porte ou mécanisme de fermeture automatique activé par un système de détection). De plus, des barres anti-panique, installées de part et d'autre de cette porte facilitent une éventuelle évacuation. Enfin, il est important de veiller à ce que l'ouverture de ces portes ne soit pas entravée par la présence d'obstacles divers.

c) Par le calfeutrement de pénétrations de murs séparatifs coupe-feu

Les gaines de ventilation et les conduites de câbles sont autant d'équipements nécessitant des pénétrations dans les murs coupe-feu. Le calfeutrement de ces ouvertures limite le risque incendie. Par exemple, le recours à des produits intumescents est un moyen de calfeutrement.

Rétention des eaux d'extinction

Afin d'éviter une pollution du sol par les eaux d'extinction potentiellement chargées en produits polluants déversées pendant l'incendie, la mise en place de systèmes de rétention de ces eaux est souhaitable.

Mesures organisationnelles

L'organisation de la sécurité du site permet de faciliter l'intervention en cas d'incendie. Les principales tâches sont les suivantes :

- élaborer une organisation incendie et des procédures (définir qui fait quoi) ;
- établir et mettre à jour des plans de l'établissement. Ce plan doit pouvoir être remis aux secours extérieurs en cas d'intervention et/ou affiché sur le site ;
- contrôler et procéder à une maintenance périodique de tous les équipements techniques de protection incendie ;
- réaliser des instructions et exercices périodiques ;
- signaler les équipements de sécurité (p. ex. : extincteurs).

Détection incendie

La détection incendie, qu'elle soit manuelle (c'est-à-dire « humaine ») ou automatique, est l'étape clef précédant toute action d'évacuation ou d'intervention. Ainsi, une installation de détection

automatique doit, tout en évitant les fausses alarmes, détecter et signaler le plus tôt et le plus exactement possible tout départ de feu. L'objectif de la détection incendie est de réduire le délai de mise en œuvre des mesures de lutte contre l'incendie et d'évacuation. Par exemple, elle peut être utile pour localiser un début d'incendie et ainsi permettre de verrouiller les séparations coupe-feu avant le déclenchement du sprinkler et de donner l'alarme.

Un système de détection automatique d'incendie comporte au minimum des détecteurs automatiques et un tableau de signalisation, qui réceptionne un signal électrique. Un détecteur a pour tâche de décélérer, dans une zone donnée, une grandeur caractéristique de l'incendie puis de la convertir en signal électrique. Si ce signal dépasse une valeur seuil, le tableau de signalisation délivre une alarme sonore et visuelle.

Les mesures de détection automatique ne doivent pas faire oublier que l'homme constitue un moyen de détection de premier choix. C'est pourquoi des déclencheurs manuels peuvent être installés.

La Figure 4 (Chorier, 2007) présente, de manière qualitative, les manifestations d'un incendie au cours du temps ainsi que le type de détecteurs adaptés à ces manifestations.

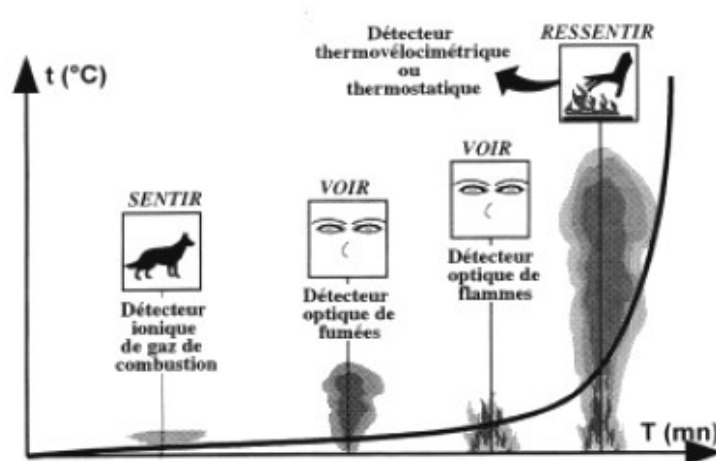


FIGURE 4 : RÉACTION DES TYPES DE DÉTECTEURS

Alarme

Un système d'alarme correspond à un ensemble de dispositifs d'avertissement, en général asservis au tableau de signalisation du système de détection. Il sert à délivrer un signal sonore et/ou visuel, dont la portée varie selon trois niveaux. Le premier correspond à l'**alarme restreinte** dont le but est de prévenir de la naissance d'un feu et de sa localisation. Cette alarme est diffusée au poste de sécurité incendie de l'établissement, à la direction ou au gardien. Le second niveau correspond à l'**alarme générale sélective**, qui vise à prévenir une partie seulement de l'établissement. Enfin, le troisième niveau, l'**alarme générale**, a pour but de prévenir tous les occupants qu'ils doivent évacuer les lieux. Les alarmes générales peuvent être immédiates ou temporisées, c'est-à-dire diffusées après l'alarme restreinte.

De plus, le signal d'alarme peut être retransmis à une station centrale de télésurveillance (p. ex. : le centre de secours). Enfin, en cas de dysfonctionnement d'une partie du système (détecteur, câblage, alimentation électrique, etc.), certains tableaux de signalisation déclenchent une alarme de « dérangement » sous forme de signaux sonores et visuels.

Moyens d'extinction

Les moyens d'extinction comprennent aussi bien ceux pouvant être utilisés par le personnel de l'établissement que ceux prévus pour l'intervention des sapeurs-pompiers. Les moyens d'extinction suivants peuvent être utilisés :

- points d'eau ;
Une réserve naturelle ou artificielle aisément accessible.
- bouches et poteaux d'incendie ;
Des appareils branchés sur les canalisations d'eau de ville permettant le raccord des lances des sapeurs-pompiers.
- appareils mobiles ;
Une source d'extinction limitée réservée à des feux localisés et modestes (p. ex : extincteur).
- robinet d'incendie armé (RIA) ;
Une installation comprenant entre autres un tuyau semi-rigide, enroulé sur un dévidoir, alimenté en permanence en eau, avec une pression et un débit suffisant.
- colonnes sèches et colonnes humides ;
Des tuyaux permettant le raccord des lances des sapeurs-pompiers pour un accès à la ressource en eau à n'importe quel étage d'un bâtiment.
- déversoirs ponctuels ;
Des systèmes destinés à inonder les locaux à risque de propagation rapide du feu.
- installation d'extinction automatique ou commande manuelle.
Un système composé de plusieurs têtes pouvant libérer un produit extincteur³¹ servant à éteindre ou au moins à contenir le feu. Le déclenchement de la tête peut être automatique (p. ex. : par destruction thermique de l'obturateur de la tête) ou manuelle.

Désenfumage

Le désenfumage a pour objectif d'extraire des locaux incendiés une partie des fumées et des gaz de combustion afin de :

- rendre praticables les cheminements utilisés pour l'évacuation du public et l'intervention des secours ;
- limiter la propagation de l'incendie en évacuant chaleur, gaz et imbrûlés vers l'extérieur.

Il peut être réalisé par :

- la gestion de la stratification des fumées au-dessus d'une zone praticable (apport d'air neuf en partie basse et évacuation des fumées en partie haute) ;
- différence de pression entre le volume à protéger et le volume sinistré ;
- combinaison des deux systèmes.

Deux types de désenfumage peuvent être distingués : d'une part le désenfumage naturel, s'appuyant sur le phénomène de tirage thermique ; et d'autre part le désenfumage mécanique, reposant sur des extracteurs et des souffleurs motorisés.

³¹ Lorsque le produit extincteur est de l'eau, le terme sprinkler est utilisé

III. L'OUTIL DE SIMULATION SCHEMA-SI

SCHEMA-SI signifie Stochastic Computation and Hybrid Event Modelling Approach - Sécurité Incendie . Il s'agit d'un outil numérique reposant sur un couplage entre un modèle physique de zones CIFI 2009 (détaillé au paragraphe III.A) et des réseaux de Petri-PTD-OO³² (détaillés au paragraphe III.B). La manière dont ce couplage est assuré est détaillée au paragraphe III.C).

SCHEMA a été développé au CSTB par (Demouge, et al., 2008). Il est codé en langage Fortran 98 pour la partie CIFI 2009 et en langage Interprété (à l'aide de l'outil de calcul numérique Scilab³³) pour la partie réseaux de Petri. L'architecture de l'outil ainsi que l'organisation des simulations de Monte Carlo sont détaillées au paragraphe III.D. Avant d'entrer plus en détail dans le fonctionnement de l'outil, quelques définitions sont fournies ci-après.

Définitions

En s'appuyant sur les simulations de Monte Carlo, SCHEMA-SI permet de générer un grand nombre de déroulements d'incendie potentiels, appelées ici des **scénarios**. Ces scénarios sont construits à partir **d'une trame** décrivant les lieux, les acteurs, les événements qui peuvent se réaliser, les interactions possibles, ainsi que les dénouements possibles (les événements marquant la fin d'un scénario). Tous les scénarios simulés sont conformes à cette trame.

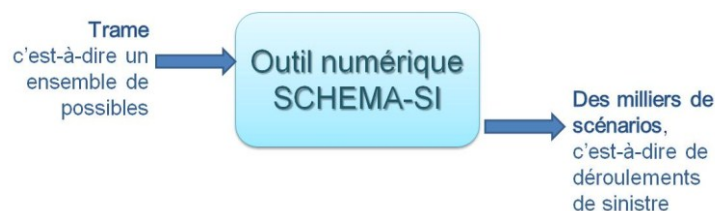


FIGURE 5 : LES ENTRÉES-SORTIES DE SCHEMA-SI

Au cours de certains scénarios, des situations de danger pour les personnes et les biens apparaissent. Ces situations correspondent à des **événements non souhaités** (E.N.S.), préalablement définis. L'occurrence de ces E.N.S. peut donc être définie et datée pour chaque scénario, et ces informations servent de bases pour évaluer le **risque incendie** encouru. Ce premier chapitre présente les hypothèses et les modèles intégrés dans SCHEMA-SI. Pour plus de détails, le second chapitre de cette thèse présente la méthode employée pour utiliser SCHEMA-SI.

III.A L'outil de simulation CIFI 2009

L'outil de simulation CIFI 2009 est un outil numérique destiné à prédire le développement du feu et les mouvements de la fumée dans les bâtiments multi-étages et multi-locaux. Après une présentation des principales hypothèses à l'origine de l'outil, son architecture est détaillée.

³² PTD-OO est l'acronyme de Prédicat-Transitions Différentiels Orientés Objet

³³ Scilab est un logiciel en open source développé par l'INRIA (Institut National de la Recherche en Informatique et Automatique) et téléchargeable sur le site Internet suivant : <http://www.scilab.org/>

III.A.a) Principales hypothèses

Le présent paragraphe est issu de (Curtat, 2002).

CIFI 2009 est un outil numérique fondé sur un modèle appartenant à la famille des modèles dits « de zones ». En outre, CIFI 2009 est un modèle dit « multi-volumes » et donc de nombreux locaux interconnectés peuvent être pris en compte. Ces modèles de zones se caractérisent par la modestie des moyens informatiques nécessaires, rendant leur utilisation compatible avec des simulations de Monte Carlo. Dans un tel modèle, l'espace d'un bâtiment est découpé en zones, dans lesquels les grandeurs physiques caractéristiques du modèle (p. ex. : température, composition des espèces chimiques, opacité, etc.) sont uniformes et instationnaires. L'idée de découper l'espace en zones vient de l'observation que les gaz chauds issus d'un foyer s'accumulent sous le plafond d'un local en présentant une frontière basse à peu près horizontale avec l'air frais situé au-dessous. Ceci est valable pour des locaux de forme géométrique classique (c.à.d. des parallélépipèdes rectangles) et pour des foyers placés en partie basse du local, assez puissants par rapport aux dimensions du local (sinon, la fumée, vite refroidie dans son ascension, se répartit en volutes ou lentilles) et en l'absence de « courants d'air » importants.

Remarque :

La notion de foyer assez puissant est empirique : pour une chambre, il s'agit de débits calorifiques de quelques dizaines de kW et, pour un grand atrium, de MW.

Dans un modèle à deux zones gazeuses comme CIFI 2009, l'espace volumique gazeux d'un local est composé de deux zones : l'une chaude notée Z_h , en haut, et l'autre plus froide notée Z_b , en bas (cf. Figure 6). L'interface entre les deux zones est une surface virtuelle traversée par endroit par des flux de masse et d'enthalpie dus aux foyers. La hauteur de cette interface, dite « hauteur d'interface thermique » ou « hauteur libre de fumée » et notée Z varie au cours du temps. L'espace solide de chaque local (les parois, le plafond, le plancher) est maillé en zones. Ce maillage est utilisé pour le calcul de la conduction. En outre, l'extérieur est également découpé en zones, une zone par face de bâtiment.

Le dessin de la Figure 6 schématise les zones gazeuses d'un local et synthétise la nature des flux massiques et énergétiques échangés entre ces zones, dans une situation où l'air entre en zone basse et où les gaz chauds sortent du local.

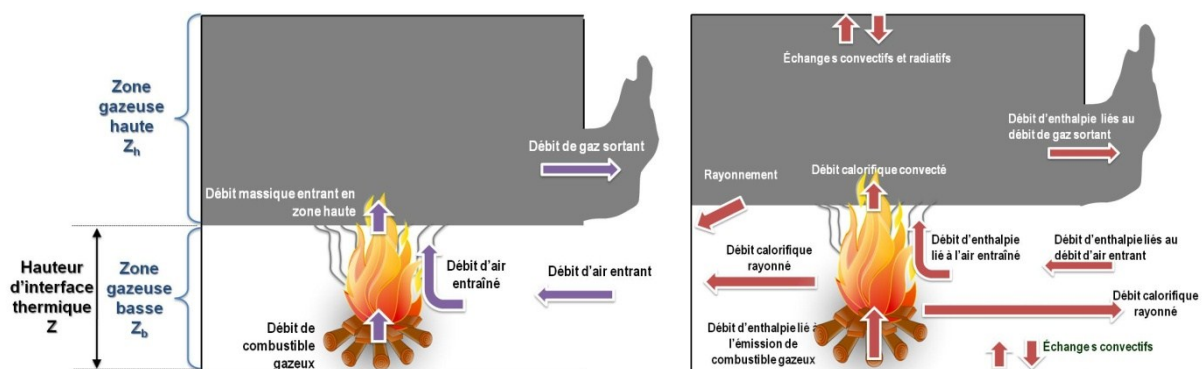


FIGURE 6 : PRINCIPAUX TERMES DE FLUX MASSIQUE (À GAUCHE) ET ÉNERGÉTIQUE (À DROITE) ÉCHANGÉS ENTRE ZONES, POUR UN SEUL FOYER DANS UN LOCAL OUVERT PAR UNE PORTE

Les bilans effectués dans les zones sont traités en considérant ces zones comme des volumes de contrôles, de la manière exposée brièvement ci-dessous et détaillée en annexes.

Les zones de gaz (zone basse, zone haute, zone de flamme et de panache, zone de monde extérieur) et les zones surfaciques solides échangent matière, espèces chimiques et énergie.

Pour les zones de surfaces solides, seuls les solides combustibles peuvent échanger de la masse, sous forme d'un flux massique de gaz de pyrolyse sortant du solide. Les zones de surfaces de parois non combustibles n'échangent que de la chaleur (dans un sens ou dans l'autre, selon l'instant considéré : elles en reçoivent pendant la croissance du feu, et en perdent durant son déclin).

Le remplissage de la zone haute Z_h se fait par l'apport de masse (sous forme d'espèces chimiques) venant des flammes et panaches thermiques et par apport d'air depuis l'extérieur, si le champ de pression et les ouvertures (dimensions, position) permettent cet apport. Le vidage de Z_h se fait par un transport de gaz chaud au travers des ouvertures, là encore si le champ de pression et les ouvertures permettent ce transport.

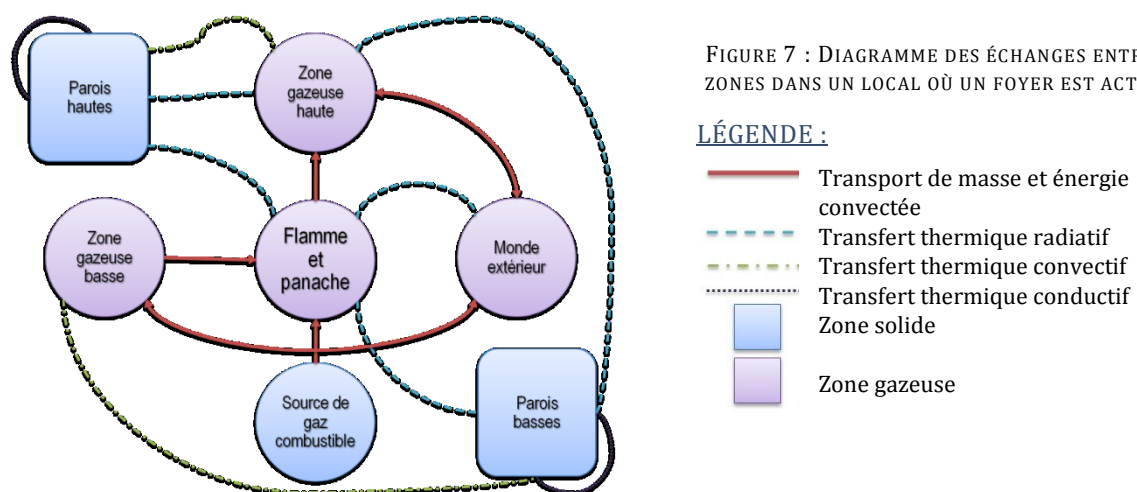
La zone basse Z_b reçoit de l'air extérieur et perd matière et énergie à cause de l'entraînement généré par les flammes et les panaches, et, éventuellement, également par le transport vers l'extérieur du local.

Les flammes et panaches sont donc, dans ce type de modèle, des « canaux » alimentant la zone haute en masse, espèces et énergie. Pour traiter les échanges radiatifs liés à une flamme, une certaine fraction de l'énergie libérée par la combustion part (vers les zones haute et basse, et vers les parois) sous forme de rayonnement. Le calcul du débit d'air entraîné par la flamme fait intervenir une variation de ses caractéristiques avec la hauteur.

La Figure 7, issue de (Curtat, 2002), illustre ces échanges pour l'exemple d'une situation de feu dans un local avec un seul foyer actif, en partie basse. Le monde extérieur et les parois n'ont pas été découpés ici en zones plus fines pour la simplicité du dessin. Pour la même raison, les ouvertures ne sont pas non plus distinguées. Sont ainsi identifiées sur la figure :

- des zones gazeuses volumique : le monde extérieur, la zone gazeuse basse Z_b , la zone gazeuse haute Z_h , la flamme, et la source de gaz combustible sous la flamme ;
- des zones de surface : les parois hautes et les parois basses, qui symbolisent globalement l'ensemble des parois.

Les arcs représentent les échanges entre ces zones : de matière, de chaleur par rayonnement thermique, de chaleur par échanges convectifs entre gaz et surface. Les échanges de matière gazeuse avec l'extérieur peuvent se faire soit dans un sens, soit dans l'autre, selon la valeur du champ de pression.



III.A.b) Architecture de l'outil CIFI 2009

La Figure 8 présente sommairement l'organisation du calcul.

Après lecture des données et initialisation (du temps, du champ de pression, du champ de température, etc.), le calcul débute pour un temps t_0 , appelé instant initial. L'évolution des grandeurs physiques se fait par intégration d'un système d'équations différentielles ordinaires (EDO) traduisant la conservation de la masse gazeuse et de l'énergie dans chacune des zones de l'ensemble des locaux traités. Ces équations constituent le **modèle aéraulique**. A ce modèle est adjoint un modèle de rayonnement. Or, pour que l'intégration du système d'EDO soit possible, il est nécessaire de calculer préalablement les flux nets (de masse et d'énergie) échangés entre le gaz et :

- les parois ;
- les ouvertures verticales ;
- les systèmes de désenfumage et de ventilation ;
- les foyers.

Ces flux sont calculés par des fonctions de calculs, appelées ici **routines CIFI 2009**³⁴ (cf. Figure 8 étape C). Après le calcul des flux massiques et énergétiques, le temps est itéré d'un pas-de-temps, noté dt et le système d'EDO est intégré pour l'instant t , dit instant courant (cf. Figure 8, étape D). Ensuite, l'évaluation des températures de parois (cf. Figure 8 étape E) est réalisée par résolution de l'équation de la chaleur. Pour réduire le temps de calcul, cette étape est découplée du calcul des caractéristiques du milieu gazeux (cf. Figure 8 étape D). Lorsque l'instant courant est supérieur à l'instant de fin de simulation, noté t_f , les résultats sont écrits et le calcul s'arrête.

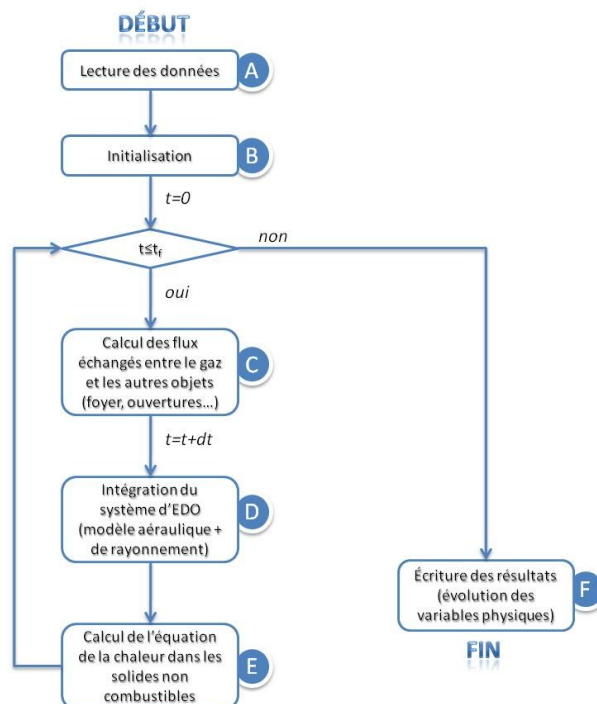


FIGURE 8 : ORGANISATION D'UN CALCUL AVEC CIFI 2009

³⁴ Les routines de CIFI 2009 sont codées en Fortran 98.

III.B Les réseaux de Petri

Le formalisme de réseaux de Petri utilisé dans SCHEMA-SI appartient à la catégorie des réseaux de Petri de haut niveau (Jensen, 1981) et (Genrich, et al., 1981). Plus précisément, il s'agit d'un formalisme de réseaux de Petri prédicat-transition différentiels orientés objets (Villani, et al., 2007). Ce formalisme, très spécifique, présente d'importantes différences par rapport au formalisme d'origine (Petri, 1962).

Afin de faciliter la compréhension de ce formalisme, les notions du formalisme (Petri, 1962) conservées dans le formalisme de (Villani, et al., 2007) sont rappelées (cf. III.B.a). Ensuite, les particularités du formalisme de (Villani, et al., 2007) par rapport au formalisme originel sont listées (cf. III.B.b). Après cela, la définition plus formelle du formalisme de (Villani, et al., 2007) est alors organisée en deux temps : d'une part la définition de l'aspect prédicat-transition différentiels (cf. III.B.c) et d'autre part celle de l'aspect orienté objets (cf. III.B.d). De plus, puisque ce formalisme est celui utilisé dans SCHEMA-SI, sa description sera illustrée d'exemples issus de la sécurité incendie. Enfin, quelques définitions relatives aux notions de conflit et de parallélisme sont fournies au paragraphe III.B.e).

III.B.a) Introduction aux réseaux de Petri

Un réseau de Petri (Petri, 1962) permet de décrire le comportement dynamique d'un système étudié. Le réseau se compose d'une **structure** et d'un **marquage**, tous deux pouvant être définis à la fois de manière graphique et mathématique.

Structure : places, transitions, arcs

Structurellement, un réseau de Petri est un graphe orienté composé de deux types de nœuds : des **places**, qui symbolisent les états du système (p. ex. : les ronds P_1 et P_2 de la Figure 9) et des **transitions**, qui symbolisent les changements d'état (p. ex. : les traits T_1 et T_2 de la Figure 9). Des **arcs** orientés relient certaines places à certaines transitions et vice versa (p. ex. : les flèches de la Figure 9). Il est impossible de relier deux places ou deux transitions par un arc.

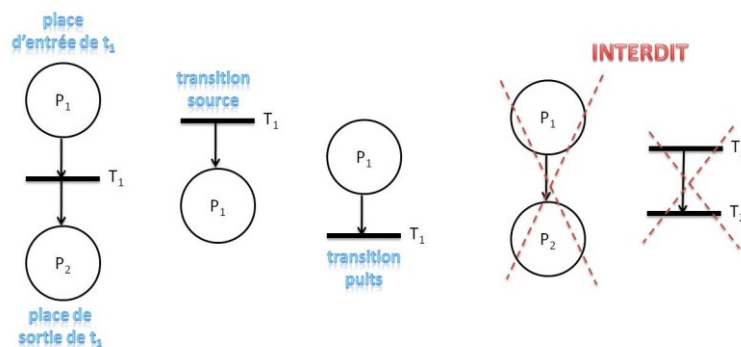


FIGURE 9 : STRUCTURE D'UN RÉSEAUX DE PETRI

Les places, les transitions et les arcs peuvent s'exprimer à l'aide des objets mathématiques vectoriels et matriciels. Ainsi, pour un réseau, on définit :

- **P**, un vecteur de dimension $N \times 1$, avec N le nombre de places ;
- **T**, un vecteur de dimension $M \times 1$, avec M le nombre de transitions ;

- **Pré**, une matrice binaire de dimension $N \times M$ contenant les arcs reliant des places à des transitions. L'élément $Pré_{i,j}$ contient 1 si la place P_i est reliée par un arc à la transition T_j et un 0 dans le cas contraire³⁵ ;
- **Pos**, une matrice binaire de dimension $N \times M$ contenant les arcs reliant des transitions à des places. L'élément $Pos_{i,j}$ contient 1 si la transition T_j est reliée par un arc à la place P_i et un 0 dans le cas contraire.

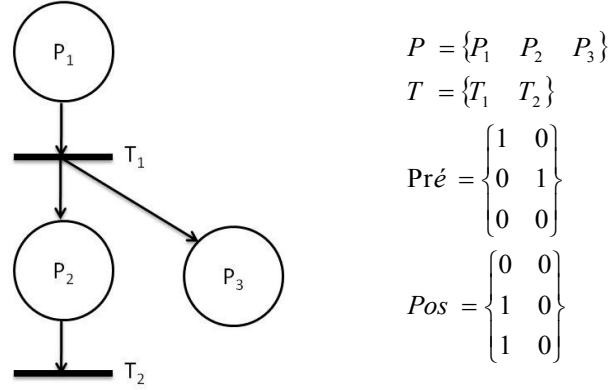


FIGURE 10 : MATHÉMATISATION DE LA STRUCTURE D'UN RÉSEAU DE PETRI

Marquage : jetons

La notion de **jeton** est ajoutée à cette description. Un jeton est symbolisé par un point noir contenu dans une place (cf. la place P_1 de la Figure 11). Le nombre de jeton contenu dans une place est un entier positif ou nul. Les places concernées sont dites **marquées** et la répartition des jetons dans l'ensemble des places est appelée le **marquage** du réseau de Petri. Un marquage donne l'état du système à un instant t . Ainsi, dans l'exemple de la Figure 11, le système est dans l'état P_1 . De plus, une transition dont la place d'entrée est marquée est dite **sensibilisée**. Ainsi, dans l'exemple de la Figure 11, la transition T_1 est sensibilisée.

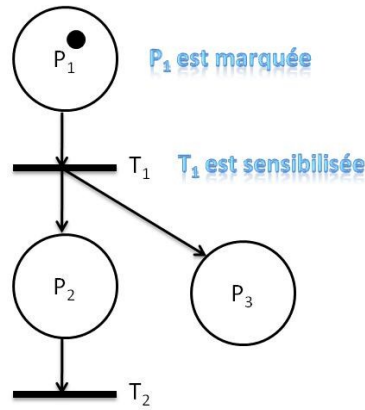


FIGURE 11 : MARQUAGE D'UN RÉSEAU DE PETRI

Mathématiquement, le marquage $\mathbf{M}$ s'exprime par un vecteur $N \times 1$, avec N le nombre de places. M_i indique le nombre de jeton contenu dans P_i , avec $M_i \geq 0$. Une transition T_j est sensibilisée si et seulement si $M_i \geq Pré_{i,j} \ \forall i$.

³⁵ Dans la présente recherche doctorale, les notions de poids des arcs ne sont pas abordées

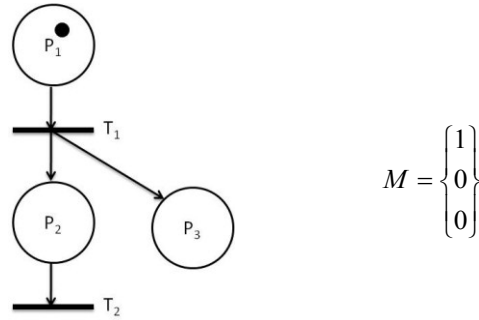


FIGURE 12 : MATHÉMATISATION DU MARQUAGE D'UN RÉSEAU DE PETRI

Franchissement de transition

Pour décrire la dynamique du système, le marquage évolue dans le temps. Cette évolution est réalisée par le **franchissement** ou **tir** de transitions (cf. Figure 13). Le franchissement d'une transition se fait en enlevant un jeton à chacune des places d'entrée de la transition et en ajoutant un jeton à chacune des places de sortie de cette même transition. **Une transition ne peut donc être tirée que si elle est sensibilisée**, c'est-à-dire que ses places d'entrée sont marquées.

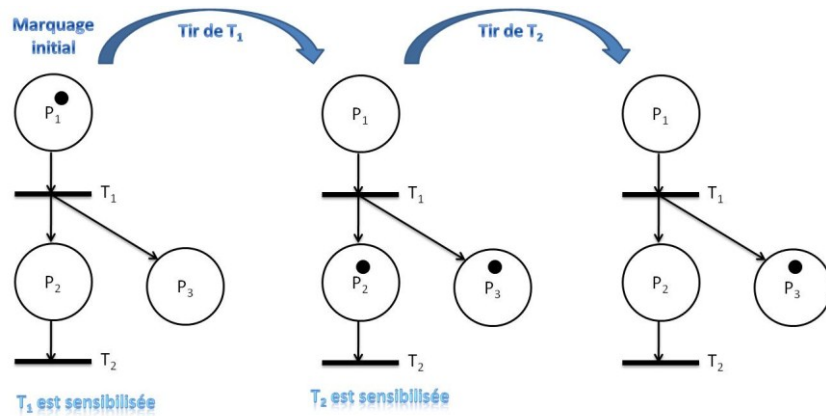
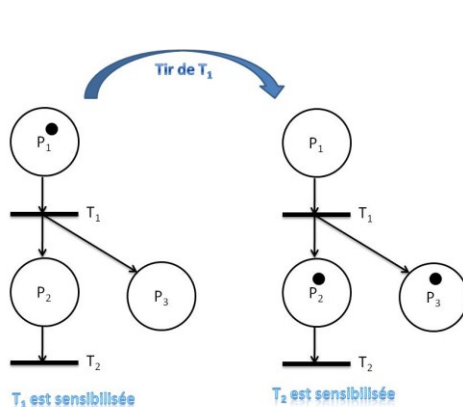


FIGURE 13 : ÉVOLUTION DU MARQUAGE D'UN RÉSEAU DE PETRI

Mathématiquement, l'évolution du marquage est prédite par un calcul matriciel. Soit S un vecteur $M \times 1$ contenant pour chaque composante j le nombre de tirs de la transition j . Soit M_0 , le marquage initial. L'évolution du marquage après les tirs des transitions s'exprime :

$$M = M_0 - \text{Pré}.S + \text{Pos}.S$$



$$\text{Soit le marquage initial : } M_0 = \begin{Bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

Soit le vecteur tir de transition :

$$S = \begin{Bmatrix} 1 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (T_1 \text{ est tirée une fois})$$

Soit le nouveau marquage après tir de T_1

$$M = \begin{Bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{Bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} 1 \\ 0 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 1 & 0 \end{Bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} 1 \\ 0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \end{Bmatrix}$$

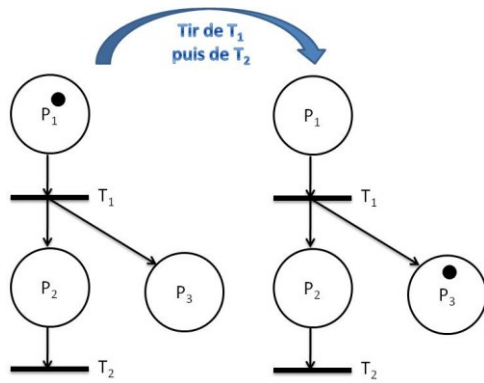


FIGURE 14 : MATHÉMATISATION DE L'ÉVOLUTION DU MARQUAGE D'UN RÉSEAU DE PETRI

Soit le vecteur tir de transition :

$$S = \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \end{Bmatrix} \quad (T_1 \text{ et } T_2 \text{ sont chacune tirée une fois})$$

Soit le nouveau marquage après tir de T_1 et de T_2

$$M = \begin{Bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{Bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 1 & 0 \end{Bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{Bmatrix}$$

III.B.b) Particularités du formalisme de réseaux de Petri prédicat-transition différentiels orientés objets

Le formalisme de réseaux de Petri de (Villani, et al., 2007) offre, en outre des réseaux classiques de (Petri, 1962), les trois particularités énoncées ci-dessous.

Tout d'abord, il s'agit d'un formalisme permettant la modélisation d'un **système dynamique hybride** c'est-à-dire qu'il permet la coexistence de processus continus avec des processus discrets. Dans SCHEMA-SI, la modélisation des processus continus porte sur l'extension du feu et sur les mouvements de la fumée tandis que celle des processus discrets s'applique à :

- la réponse du système de sécurité ;
- le comportement humain ;
- la réponse du bâtiment ;
- certains phénomènes relatifs au foyer tels que l'allumage, l'occurrence d'un embrasement généralisé (dit *flashover* en anglais) ou encore l'extinction volontaire.

Ensuite, il s'agit d'un formalisme qui permet l'introduction de **processus aléatoires**. Dans SCHEMA-SI, cette particularité est utilisée pour prendre en compte la dimension imprévisible des accidents de la manière suivante :

- par la détermination aléatoire de conditions initiales (heure du sinistre, premier objet prenant feu, local où le feu débute, présence d'occupants dans la pièce, position des ouvrants, etc.) ;
- par la détermination d'une plage de variation des facteurs déclenchant les événements discrets (intervalle de temps, intervalle de sensibilité des composants techniques de sécurité, fréquence d'occurrence, etc.) ;
- par la détermination aléatoire des conséquences de l'occurrence des événements discrets (défaillance, pourcentage de réussite d'une action, etc.).

Enfin, la dernière particularité offerte par le formalisme est l'**orientation objet**. L'orientation objet consiste à modéliser informatiquement un élément du monde réel (p. ex. : un détecteur) en une entité informatique. Cette entité informatique, appelée objet, se compose de données informatiques regroupant les principales caractéristiques de l'élément du monde réel (p. ex. : la position du détecteur, ses dimensions, sa sensibilité, son taux de défaillance, etc.). Dans le formalisme, un objet prend la forme d'un réseau de Petri dit élémentaire. Concrètement, il s'agit d'un réseau indépendant qui interagit avec d'autres réseaux indépendants. Cette notion de réseau de Petri élémentaire est approfondie au paragraphe III.B.d).

III.B.c) Définition du formalisme de réseaux de Petri prédicat-transition différentiels

Un réseau de Petri prédicat-transition différentiels (PTD) se compose d'une **structure**, d'un **marquage** et d'**annotations**. Ainsi, un réseau de Petri PTD diffère d'un réseau classique par la **présence d'annotations**, que nous allons expliquer de manière plus approfondie à l'aide de l'exemple de la Figure 15. Cet exemple correspond à une installation de détection incendie qui alerte un agent du personnel de sécurité.

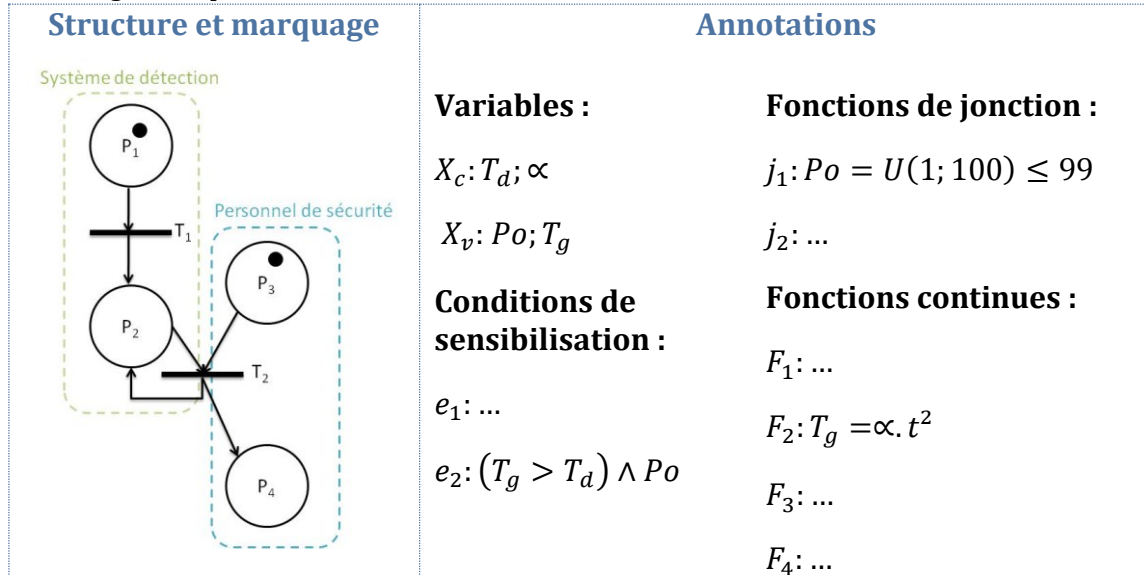


FIGURE 15 : UN EXEMPLE DE RÉSEAU DE PETRI PRÉDICAT-TRANSITION DIFFÉRENTIEL

Sur cette figure, la **structure et le marquage** apparaissent dans la colonne de gauche et les **annotations** apparaissent dans la colonne de droite. La structure et le marquage sont tout d'abord commentés avant de fournir la signification des annotations dans un deuxième temps.

Structure et marquage

La **structure** du réseau de la Figure 15 se compose de quatre places et de deux transitions, dont les significations sont les suivantes :

- P_1 : l'installation de détection n'est pas encore initialisée ;
- P_2 : la température augmente dans le local contenant le détecteur, prêt à fonctionner ;
- P_3 : l'agent de sécurité est à son poste et n'est pas encore alerté ;
- P_4 : l'agent de sécurité est alerté ;
- T_1 : transition d'initialisation (sert à initialiser les variables aléatoires) ;
- T_2 : détection et retentissement de l'alarme restreinte au poste de sécurité.

Le **marquage** apparaissant sur la Figure 15 correspond au marquage initial. Celui-ci indique que :

- l'installation de détection n'est pas encore initialisée (P_1 est marquée) ;
- l'agent de sécurité est au poste de sécurité, non alerté (P_3 est marquée).

Annotations

Les **annotations** se composent :

- d'un ensemble de **variables** ;
- d'un ensemble de **conditions de sensibilisation** ;
- d'un ensemble de **fonctions de jonction** ;
- d'un ensemble de **fonctions continues**.

D'une part, les **variables**, notées X , sont utilisées pour caractériser le système ainsi que son comportement. L'exemple de la Figure 15 contient les quatre variables suivantes :

- T_g : la température du gaz dans la pièce dans laquelle se trouve le détecteur ;
- α : un coefficient traduisant la cinétique de la combustion dans cette pièce ;
- T_d : la température à partir de laquelle le détecteur s'active (seuil de détection) ;
- Po : une variable booléenne « vraie » si le détecteur fonctionne et « fausse » s'il est défaillant.

D'autre part, deux types de variables peuvent être distingués :

- les constantes, dont la valeur reste fixe pour tous les scénarios. Elles sont notées X_c ;
- les variables, dont la valeur est modifiée au cours d'un scénario et/ou dont la valeur initiale peut différer d'un scénario à l'autre. Elles sont notées X_v .

Dans l'exemple de la Figure 15, le seuil de détection (T_d) et le coefficient de cinétique de combustion (α) ne varient jamais. Elles sont donc toutes deux des constantes. En revanche, la température du gaz (T_g) évolue tout au long du scénario, et la variable de fonctionnement de détecteur (Po) n'a pas la même valeur initiale dans tous les scénarios. Toutes deux sont donc des variables.

Les **conditions de sensibilisation** sont des expressions booléennes, exprimées à l'aide des variables. Leur rôle est d'ajouter des conditions à respecter pour permettre le tir des transitions (cf. paragraphe ci-dessous). Il en découle qu'une condition de sensibilisation, notée e_i , est toujours associée à une transition. Ainsi, tout réseau contient toujours autant de conditions de sensibilisation que de transitions. Par exemple, puisqu'il y a deux transitions dans la Figure 15, il y a également deux conditions de sensibilisation : e_1 et e_2 .

L'ajout de ces conditions modifie les lois de tir de transitions par rapport au formalisme de (Petri, 1962). En effet, à présent, une transition T_j est dite sensibilisée si et seulement si le marquage permet le tir (les places d'entrée de T_j sont suffisamment marquées) ET la condition de sensibilisation e_j est vérifiée. Dans l'exemple de la Figure 15, e_1 vaut « ... », ce qui signifie qu'aucune condition n'est ajoutée. Il en découle que le tir de T_1 a lieu dès que P_1 est marquée. En revanche, des conditions sont ajoutées dans e_2 . Ainsi, si à la fois P_2 et P_3 sont marquées, le tir de T_2 ne peut avoir lieu qu'à condition :

- que la température du gaz T_g dépasse la température de détection T_d (cf. $T_g > T_d$) ;
- et (cf. $\wedge$) que le système de détection ne soit pas défaillant (cf. Po).

Remarque :

Dans une condition booléenne, $\wedge$ signifie ET ; $\vee$ signifie OU.

Les **fonctions de jonction** sont des expressions mathématiques servant à modifier la valeur d'une ou de plusieurs variables. La modification a lieu au moment d'un tir de transition. Elle correspond donc à une modification discrète. À chaque transition T_j est associée une fonction de jonction, notée j_j . Tout réseau contient autant de fonctions de jonction que de transitions. Pour cette raison, l'exemple de la Figure 15 contient deux fonctions de jonctions : j_1 et j_2 . Toujours dans cet exemple, la fonction j_1 sert à tirer aléatoirement la valeur de la variable Po . Cette variable est « vraie » dans 99% des scénarios et « fausse » dans 1% des scénarios, ce qui signifie que le système de détection a un taux de disponibilité de 99%. En revanche, la fonction j_2 ne modifie aucune variable (cf. « ... »).

Remarque :

La fonction $U(x_1; x_2)$, appelée dans la fonction de jonction j_1 , renvoie un nombre relatif entre x_1 et x_2 avec une loi de distribution uniforme.

Les **fonctions continues** sont des expressions mathématiques servant à modifier la valeur d'une ou de plusieurs variables. La modification a lieu tout le temps qu'une place est marquée, ce qui correspond à une modification continue. À chaque place P_i est associée une fonction continue, notée F_i . Un réseau contient donc autant de fonctions continues que de places. Pour cette raison, l'exemple de la Figure 15, qui contient quatre places, contient quatre fonctions continues : F_1 , F_2 , F_3 et F_4 . Parmi ces fonctions, seule F_2 modifie une variable. Dans cet exemple, il s'agit de la variable T_g , qui croît selon une loi qui dépend du temps et du coefficient α . La valeur de cette variable augmente tant que la place P_2 est marquée.

III.B.d) Les réseaux de Petri prédicat-transition différentiels et le paradigme orienté objet

Le paradigme orienté **objet** consiste à **découper** un système étudié en **différents objets interagissant** les uns avec les autres (p. ex. : l'objet « détecteur » interagissant avec l'objet « personnel de sécurité »). Ce découpage facilite la modélisation en morcelant le problème. Si des objets fonctionnent de manière rigoureusement identique, alors ils peuvent être regroupés dans ce que l'on appelle une classe.

Tout d'abord, la notion **d'objet** dans le formalisme est définie. Ensuite, les deux modes d'interaction entre les objets sont identifiés et commentés. Enfin, la manière de constituer le système après le découpage en objets est expliquée.

Définition d'un objet comme un réseau de Petri prédicat-transition différentiels élémentaire

Chaque **objet** k est représenté par un **réseau de Petri élémentaire** (RDPE). Chaque réseau de Petri élémentaire se compose d'une structure, d'un marquage et d'annotations qui lui sont propres. À l'ensemble des variables $\{X\}$, des vecteurs $\{P, T, S \text{ et } M\}$, des matrices $\{\text{Pré et Pos}\}$, des conditions de sensibilisation $\{e\}$ et des fonctions $\{j \text{ et } F\}$ sont ajoutées **un indice k** de manière à les différencier entre objets. Il en découle que :

- $P_{i,k}$ désigne la place $n^\circ i$ du RDPE représentant l'objet $n^\circ k$;
- $T_{j,k}$ désigne la transition $n^\circ j$ du RDPE représentant l'objet $n^\circ k$;
- $\text{Pré}_{i,j,k}$ renseigne sur la présence ou l'absence d'un arc allant de la place $n^\circ i$ à la transition $n^\circ j$ du RDPE représentant l'objet $n^\circ k$;
- $\text{Pos}_{i,j,k}$ renseigne sur la présence ou l'absence d'un arc allant de la transition $n^\circ j$ à la place $n^\circ i$ du RDPE représentant l'objet $n^\circ k$;
- $S_{j,k}$ désigne le nombre de fois que la transition $n^\circ j$ doit être tirée pour faire évoluer le marquage du RDPE représentant l'objet $n^\circ k$;
- $M_{i,k}$ désigne le nombre de jetons présents dans la place $n^\circ i$ du RDPE représentant l'objet $n^\circ k$;
- $e_{j,k}$ désigne la condition de sensibilisation de la transition $n^\circ j$ du RDPE représentant l'objet $n^\circ k$;
- $j_{j,k}$ désigne la fonction de jonction de la transition $n^\circ j$ du RDPE représentant l'objet $n^\circ k$;
- $F_{i,k}$ désigne la fonction continue de la place $n^\circ i$ du RDPE représentant l'objet $n^\circ k$;
- $X_{c,1,k}$ désigne la première constante du RDPE représentant l'objet $n^\circ k$;
- $X_{v,1,k}$ désigne la première variable non constante du RDPE représentant l'objet $n^\circ k$.

Plusieurs objets de fonctionnement identiques seront caractérisés par des RDPE similaires. Dans ce cas, des classes d'objets apparaissent. Tous les RDPE d'une même classe auront de similaire le nombre et le nom de variables ainsi que la structure de leur réseau. Leur marquage et la valeur de leurs variables peuvent différer.

Interactions entre objets

Dans la réalité, différents objets sont souvent interconnectés. Pour représenter cette interconnexion, des **interactions** entre RDPE sont prévues. Deux types d'interactions sont possibles dans le formalisme. D'une part, des **interactions discrètes par fusion de transitions** (cf. paragraphe a.) et d'autre part, des **interactions continues par partage de variables** (cf. paragraphe b).

a. Fusion de transitions

La fusion de transitions traduit les cas où un objet quelconque k_1 manipule, agit sur, actionne, informe et donc fait changer d'état un autre objet quelconque k_2 (p. ex. : une alarme alerte un individu). Concrètement, cette fusion a pour effet de **synchroniser le tir de transitions** entre les deux objets k_1 et k_2 . En effet, pour que le tir ait lieu, il est nécessaire que les transitions $T_{j,k1}$ et $T_{j,k2}$ à fusionner soient sensibilisées. La transition $T_{j,k1}$ est appelée **transition active** : c'est l'objet k_1 qui agit sur l'objet k_2 . Ces transitions sont repérées par un rectangle noir (cf. Figure 16). La transition $T_{j,k2}$ est appelée **transition passive** : l'objet k_2 subit l'action de k_1 . Ces transitions sont repérées par un rectangle blanc (cf. Figure 16). Une transition non concernée par une fusion est appelée **transition interne** et est représentée par un trait noir. Le paragraphe suivant illustre la fusion de transitions par un exemple.

Exemple :

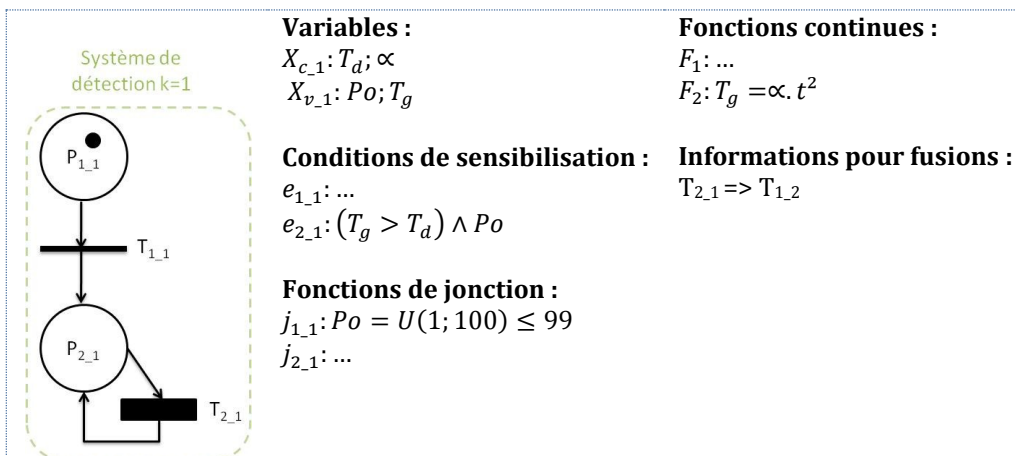
Reprenons l'exemple de l'installation de détection alertant un agent du personnel de sécurité décrit au paragraphe III.B.a). Si la logique de découpage en objets est appliquée à l'exemple, deux objets apparaissent :

- d'une part l'installation de détection (k_1) ;
- d'autre part l'agent de sécurité (k_2).

Pour pouvoir construire deux RDPE indépendants, le réseau de la Figure 15 doit être séparé en deux. Pour y parvenir, la transition T_2 représentée sur la Figure 16 est éclatée en deux transitions amenées à fusionner :

- d'une part la transition $T_{2,1}$ de la Figure 16 (cf. 1^e ligne – système de détection) ;
- d'autre part la transition $T_{1,2}$ de la Figure 16 (cf. 2^e ligne – agent de sécurité).

Enfin, la transition T_1 de la Figure 15 devient la transition $T_{1,1}$ de la Figure 16.



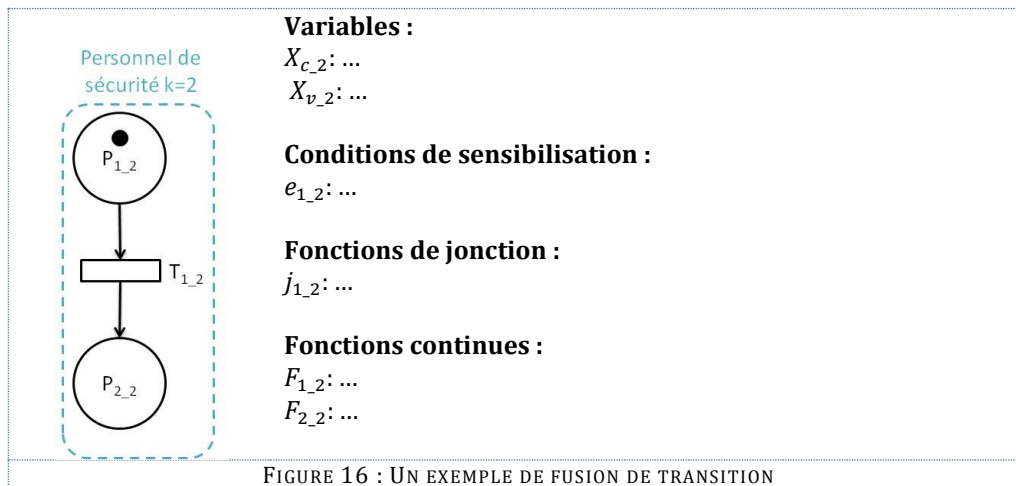


FIGURE 16 : UN EXEMPLE DE FUSION DE TRANSITION

Au terme du découpage, les trois types de transitions sont illustrés sur la Figure 16 :

- la transition $T_{2,1}$ est active car le système de détection alerte le personnel (elle est donc représentée par un rectangle noire) ;
- la transition $T_{1,2}$ est passive car le personnel est alerté par le système de détection (elle est donc représentée par un rectangle blanc) ;
- la transition $T_{1,1}$ est interne puisqu'elle ne concerne que le système de détection (elle est donc représentée par un trait).

Chacun des objets dispose maintenant de sa propre structure, de son propre marquage et de ses propres annotations. Sur cet exemple, toutes les annotations sont concentrées dans l'objet « système de détection » mais cette configuration ne saurait refléter le cas général. De plus, par rapport à la Figure 15, des informations supplémentaires sont apparues dans les annotations : les **informations concernant les fusions**. Dès qu'un réseau contient une transition active, il est nécessaire de stipuler avec quelle transition passive la fusion doit se faire. Dans cet exemple, la transition active $T_{2,1}$ doit fusionner avec la transition passive $T_{1,2}$.

Cependant, même si les RDPE sont maintenant bien distincts, leurs évolutions restent liées. En effet, puisque les deux transitions $T_{2,1}$ et $T_{1,2}$ sont amenées à fusionner, elles sont obligatoirement tirées en même temps. Pour que ce tir ait lieu, il est alors nécessaire qu'à la fois $T_{2,1}$ et $T_{1,2}$ soient sensibilisées, c'est-à-dire que :

- les places $P_{2,1}$ (le système de détection est prêt à fonctionner) et $P_{1,2}$ (l'agent de sécurité est à son poste) soient marquées ;
- **ET** que les conditions de sensibilisation $e_{2,1}$ (le seuil de détection est atteint et le système de détection n'est pas défaillant) et $e_{1,2}$ (aucune condition dans cet exemple) soient validées.

En définitive, les fusions de transitions permettent d'introduire des **synchronisations d'événements entre deux objets distincts**. Toutefois, quelques règles doivent être respectées lors du recours aux fusions de transitions :

- une transition active (noire) peut fusionner avec plusieurs transitions passives (blanches) d'un même objet ;
- une transition active (noire) ne peut pas fusionner avec plusieurs transitions passives (blanches) d'objets différents ;
- plusieurs transitions actives (noires) d'objets différents peuvent fusionner avec la même transition passive (blanche) ;

- pour chaque transition active, les informations nécessaires à la fusion (n° k du RDPE, n°j de la transition) doivent être déclarées.

b. Partage de variables

Le partage de variables est utilisé lorsqu'un objet k_2 (p. ex. : le personnel de sécurité) doit **connaître à chaque instant la valeur d'une variable d'un autre objet** k_1 (p. ex. le système de détection). Pour gérer un partage de variables, les notions de variables **privées, publiques et images** sont ajoutées. Concrètement une **variable privée** ne peut être lue que par l'objet qui la contient. A l'inverse, les **variables publiques** peuvent être lues par n'importe quel autre objet. Pour que cette lecture soit effective, il est néanmoins indispensable que l'objet k_2 dispose d'une **variable image** pour chaque variable publique qu'il lit chez k_1 . La variable image sert donc à copier, à chaque instant, la valeur de la variable lue chez un autre objet.

En récapitulant, chaque RDPE contient des variables :

- constantes et privées, notées X_{ci} ;
- variables et privées, notées X_{vi} ;
- constantes et publiques, notées X_{cp} ;
- variables et publiques, notées X_{vp} ;
- images, notées X_{im} .

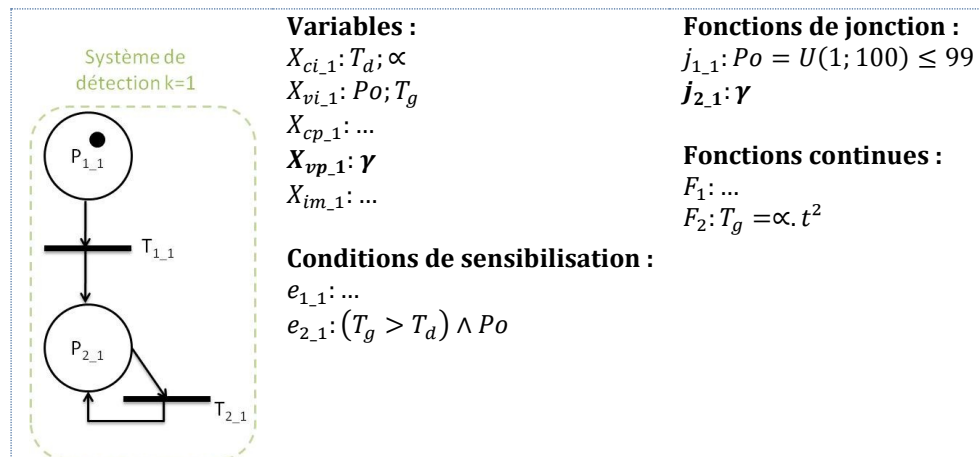
Remarque :

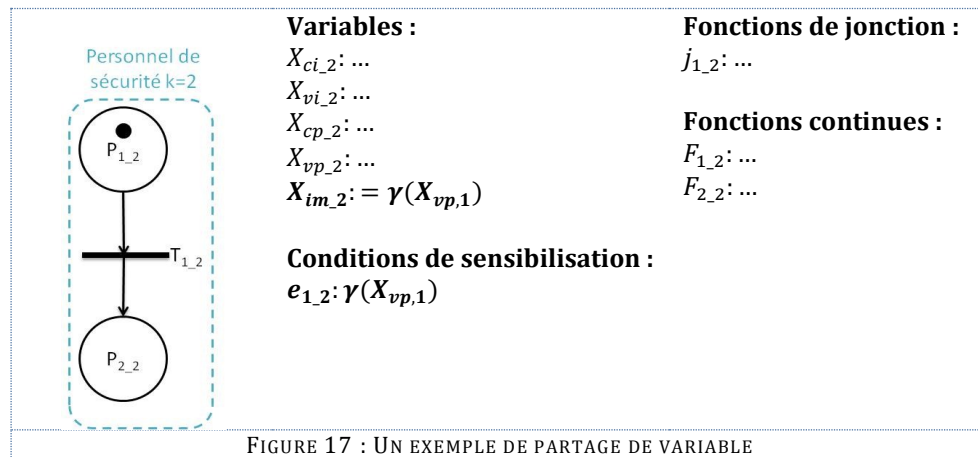
Un objet k_2 ne peut en aucun cas modifier la valeur d'une variable qu'il lit chez un autre objet k_1 .

Exemple :

Reprenons l'exemple de l'installation de détection alertant un agent du personnel de sécurité décrit au paragraphe III.B.a). Gardons la même logique de découpage en deux objets : d'une part l'installation de détection (k_1) et d'autre part l'agent de sécurité (k_2).

Là encore, pour pouvoir construire deux RDPE indépendants, le réseau de la Figure 15 doit être séparé en deux. Tout comme précédemment, cette séparation consiste à éclater la transition T_2 en deux transitions $T_{2,1}$ (cf. Figure 17) et $T_{1,2}$ (cf. Figure 17). Cependant dans cet exemple, ces deux transitions restent internes et leur synchronisation est assurée par un partage de variable. Les nouveautés ajoutées dans les annotations sont repérées en gras dans la Figure 17. Elles sont commentées sous la figure.





Tout d'abord, une nouvelle variable est ajoutée dans le RDPE k_1 (système de détection) : **la variable γ** . Cette variable est une variable booléenne qui prend la valeur « vraie » dès que le détecteur est activé, c'est-à-dire dès que la transition $T_{2,1}$ est tirée (cf. la fonction de jonction $j_{2,1}$). De plus, cette variable est publique, c'est-à-dire que d'autres objets peuvent la lire.

Une nouvelle variable est également ajoutée dans le RDPE k_2 (personnel de sécurité) : **la variable $\gamma(X_{vp,1})$** . Cette variable n'est autre que l'enregistrement, mis à jour en temps réel, de la valeur de la variable γ . En effet, la notation $\gamma(X_{vp,1})$ désigne la variable publique γ de l'objet k_1 . Cette variable $\gamma(X_{vp,1})$ est alors utilisée pour déclencher le tir de la transition $T_{1,2}$ (cf. la fonction de sensibilisation $e_{1,2}$).

Sur cet exemple, le partage de variable a pour effet la synchronisation du tir des deux transitions $T_{2,1}$ et $T_{1,2}$ puisque le tir de la transition $T_{2,1}$ est immédiatement suivi par celui de la transition $T_{1,2}$. Cet exemple a été retenu pour faire le parallèle avec les exemples précédents. Cependant, le rôle du partage de variable est plus vaste que la simple synchronisation de tirs de transitions.

Constitution du système : assemblage des réseaux élémentaires

Lorsque l'ensemble des objets de la trame a été représenté par des RDPE, il convient de **constituer un seul réseau** pour pouvoir procéder aux simulations. Cette phase, dite phase d'assemblage, revient à fusionner les transitions actives et les transitions passives. Cette phase d'assemblage se déroule en trois étapes, illustrées sur les figures suivantes.

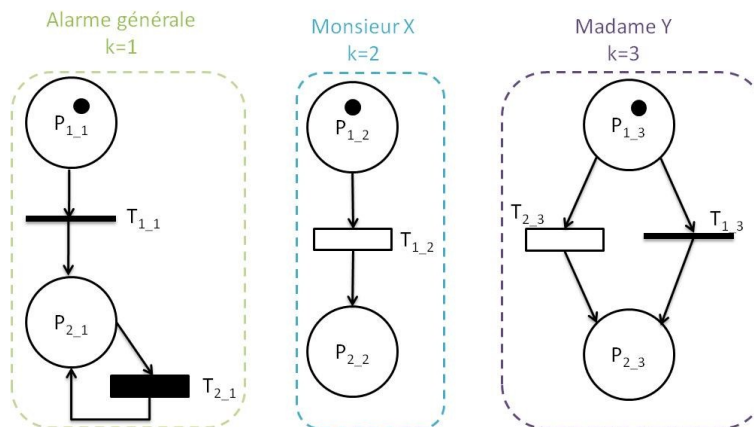


FIGURE 18 : ÉTAPE 1 DE L'ASSEMBLAGE DES RÉSEAUX ÉLÉMENTAIRES - IDENTIFICATION DES OBJETS ET DES TRANSITIONS CONCERNÉS

L'assemblage débute par l'identification des objets et des transitions concernés. Sur l'exemple de la Figure 18, la transition active $T_{2,1}$ (l'alarme générale retentit) doit fusionner avec les transitions passives $T_{1,2}$ (Monsieur X est alerté par l'alarme) et $T_{2,3}$ (Madame Y est alertée par l'alarme).

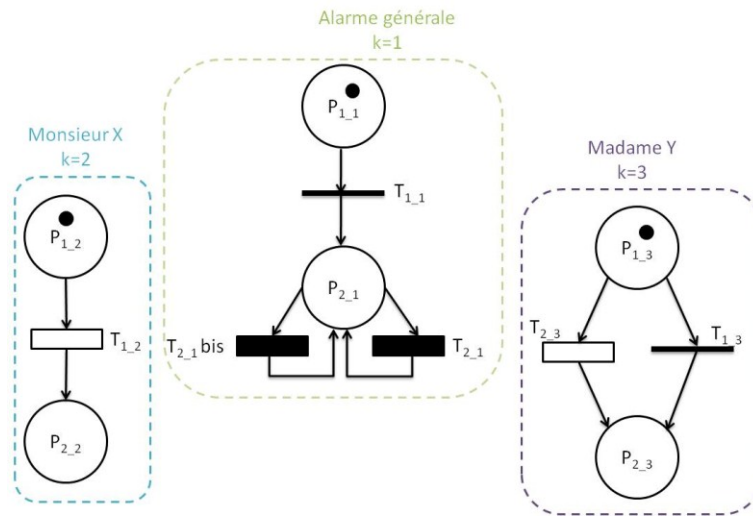


FIGURE 19 : ÉTAPE 2 DE L'ASSEMBLAGE DES RÉSEAUX ÉLÉMENTAIRES - DUPLICATION DES TRANSITIONS

S'en suit une étape de duplication des transitions de manière à obtenir autant de transitions passives que de transitions actives à fusionner. Sur l'exemple de la Figure 19, la transition active $T_{2,1}$ est dupliquée en $T_{2,1}$ et $T_{2,1bis}$ afin que chacune puisse fusionner avec l'une des transitions passives.

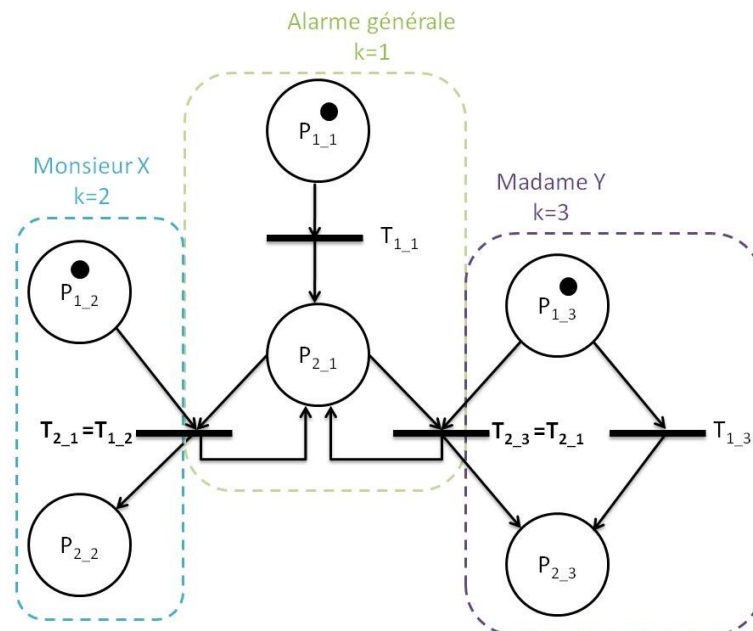


FIGURE 20 : ÉTAPE 3 DE L'ASSEMBLAGE DES RÉSEAUX ÉLÉMENTAIRES - FUSION DES TRANSITIONS

Enfin, l'étape de fusion a lieu et l'assemblage est achevé. À l'issu de ce travail d'assemblage, les RDPE sont remplacés par un seul réseau (cf. Figure 20). Ce réseau, représentant le système, est joué, c'est-à-dire que le marquage évolue.

III.B.e) Quelques définitions additionnelles

Conflit

Deux transitions T_1 et T_2 sont en **conflit structurel** (cf. Figure 21) si et seulement si elles ont au moins une place d'entrée en commun (le produit scalaire de leur vecteurs Pré est différent de zéro).

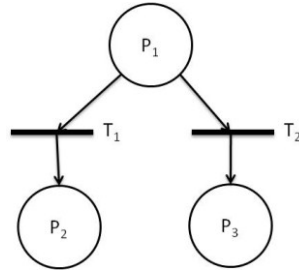


FIGURE 21 : ILLUSTRATION D'UN CONFLIT STRUCTUREL

Deux transitions T_1 et T_2 sont en **conflit effectif** pour un marquage M si et seulement si au même instant t , les transitions T_1 et T_2 :

- sont en conflit structurel ;
- leurs places d'entrées sont suffisamment marquées ;
- leurs conditions de sensibilisation sont simultanément validées.

C'est-à-dire qu'elles sont toutes deux sensibilisées, comme l'illustre la Figure 22.

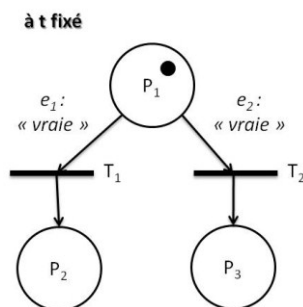


FIGURE 22 : ILLUSTRATION D'UN CONFLIT EFFECTIF

Le tir de deux transitions en conflit effectif génère un marquage dont l'une des composantes est négative, ce qui est strictement interdit dans le formalisme. Ainsi, les conflits effectifs doivent à tout prix être évités.

Parallélisme

Deux transitions sont parallèles structurellement si elles n'ont aucune place d'entrée commune (le produit scalaire de leur vecteurs Pré est nul). Par exemple, les transitions T_3 et T_4 de la Figure 23 sont structurellement parallèles.

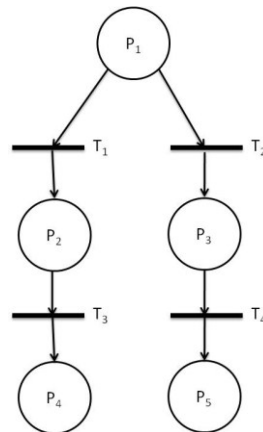


FIGURE 23 : ILLUSTRATION DU PARALLÉLISME STRUCTUREL

T_3 et T_4 sont effectivement parallèles si et seulement si au même instant t , les transitions T_3 et T_4 :

- sont en parallélisme structurel ;
- leur place d'entrée sont suffisamment marquées ;
- leurs conditions de sensibilisation sont validées.

C'est-à-dire qu'elles sont toutes deux sensibilisées, comme l'illustre la Figure 24.

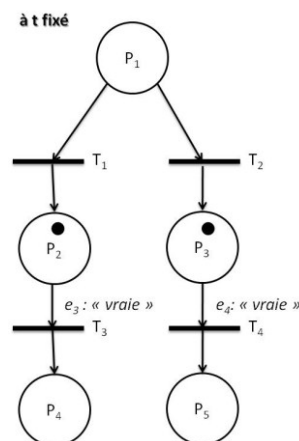


FIGURE 24 : ILLUSTRATION DU PARALLÉLISME FONCTIONNEL

Le tir de deux transitions en parallèle représente des événements pouvant survenir indépendamment l'un de l'autre, chacun à leur rythme.

Contrainte liée à la manière dont l'outil SCHEMA-SI est construit

Pour des raisons de compatibilité avec l'outil SCHEMA-SI, **les transitions sources et les transitions puits sont interdites**. Nous verrons plus en détail la manière de contourner cet obstacle.

III.C Couplage entre les réseaux de Petri et CIFI 2009

Ce paragraphe détaille la manière dont le couplage entre les réseaux de Petri et CIFI 2009 est assuré.

III.C.a) Utilisation de routines CIFI 2009 dans les réseaux de Petri

Dans SCHEMA-SI, les RDPE sont utilisés pour représenter les objets d'un bâtiment **à l'exception du gaz** présent dans les locaux. Selon leur état, certains de ces objets (p. ex. : une porte, un foyer, une paroi) échangent de la masse et de l'énergie avec le gaz. Ces échanges sont calculés **dans les RDPE** représentant ces objets par des **appels à des routines de CIFI 2009**.

Dans SCHEMA-SI, il existe **deux manières** d'appeler des routines de CIFI 2009 :

- soit dans une **fonction continue** ;
- soit dans une **fonction de jonction**.

En d'autres termes, ces appels sont réalisés :

- soit durant le **marquage d'une place** (cas des fonctions continues) ;
- soit lors du tir **d'une transition** (cas des fonctions de jonction).

Le choix du type de l'appel **dépend de ce qui est calculé par la routine** appelée :

- s'il s'agit d'un **flux de masse et d'énergie entre l'objet et le gaz**, l'appel se fait obligatoirement dans une **fonction continue**. Par convention, les places concernées par ce type d'appel sont alors **coloriées en bleu** ;
- s'il s'agit du calcul de la **diffusion de la chaleur dans l'objet** (p. ex. : la résolution de l'équation de la chaleur dans une paroi), l'appel se fait obligatoirement dans une **fonction de jonction**. La transition concernée doit alors être **tirée de manière périodique** (p. ex. : toutes les secondes).

Chaque routine de CIFI 2009 est considérée comme une boîte noire, qui transforme des variables d'entrée X_i en variables de sortie Y_i . Pour qu'un RDPE puisse appeler une routine, les variables d'entrée doivent être déclarées parmi les variables du RDPE. Des exemples d'appels sont fournis au troisième chapitre et en annexes.

III.C.b) Des variables connues dans l'ensemble de l'environnement SCHEMA-SI

Les variables calculées par CIFI 2009 sont à portée très générale et sont connues par défaut dans tout l'environnement SCHEMA-SI (les variables en question sont listées ci-dessous). Il en découle que n'importe quel objet peut en lire la valeur. Toutefois, pour que cette lecture soit possible, la variable en question doit préalablement être définie comme variable image dans le RDPE représentant l'objet.

Liste des variables connues par défaut dans tout l'environnement de SCHEMA-SI

Pour chaque local i , les variables physiques suivantes sont connues dans tout l'environnement :

- la température de la zone haute : T_{zh}^i ;
- la température de la zone basse : T_{zb}^i ;
- la hauteur d'interface thermique : Z^i ;
- la masse de la zone haute : m_{zh}^i ;
- la masse de la zone basse : m_{zb}^i ;
- le volume du local : V^i ;
- le différentiel de pression entre le local et une pression de référence (ici la pression initiale au niveau du sol) : ΔP^i ;
- la fraction massique de l'espèce chimique X dans la zone haute : $Y_{X;zh}^i$;
- la fraction massique de l'espèce chimique X dans la zone basse : $Y_{X;zb}^i$;
- la densité surfacique de flux incident sur les parois en zone haute : Φ_{zh}^i ;
- la densité surfacique de flux incident sur les parois en zone basse : Φ_{zb}^i .

Avec l'espèce chimique X à choisir parmi les possibilités suivantes :

- combustible : $X=f$;
- comburant : $X=O_2$;
- suies : $X=C$;
- dioxyde de carbone : $X=CO_2$;
- monoxyde de carbone : $X=CO$;
- eau : $X=H_2O$.

A ces variables, il faut ajouter les variables liées au temps :

- le pas-de-temps : dt ;
- l'instant courant : t .

III.D Architecture de l'outil SCHEMA-SI

La Figure 25 présente sommairement l'organisation d'un calcul avec SCHEMA-SI.

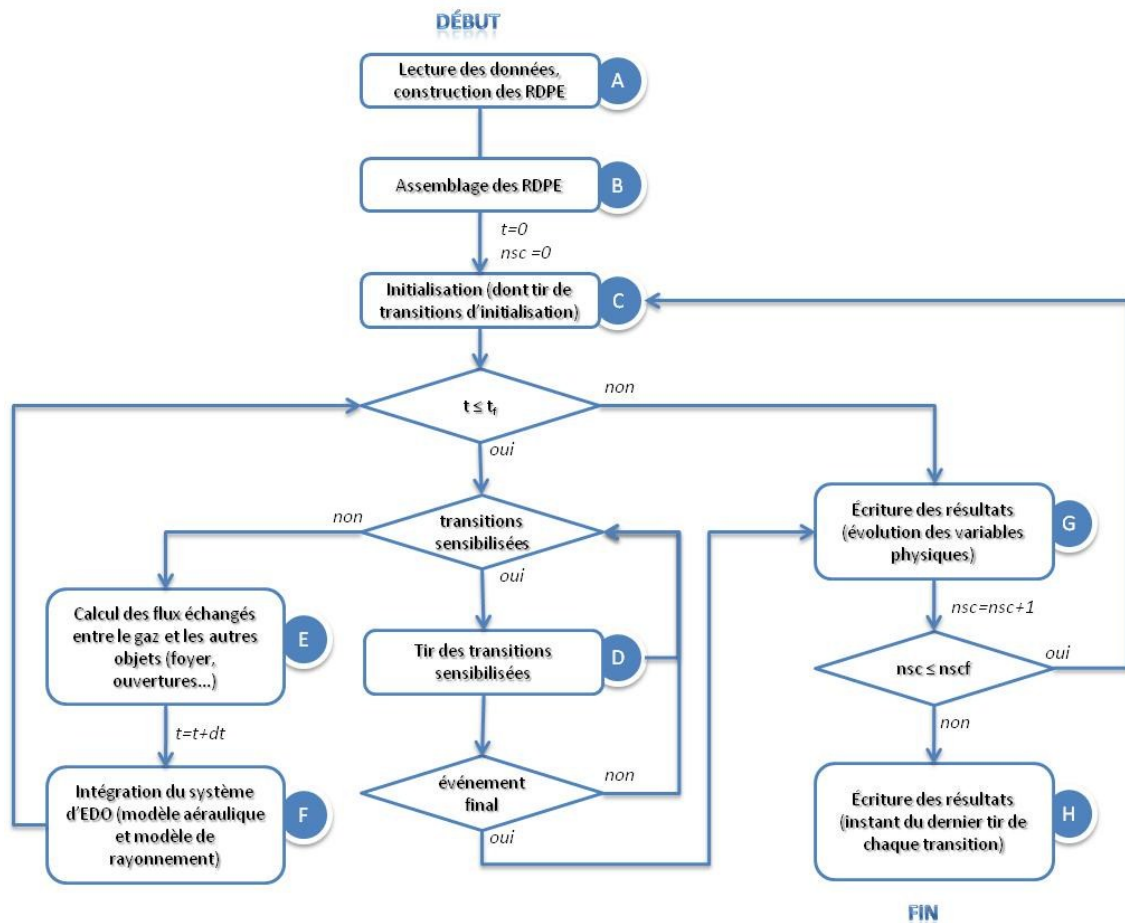


FIGURE 25 : ORGANISATION D'UN CALCUL AVEC SCHEMA-SI

Après la lecture des données et la construction des RDPE (cf. Figure 25 étape A) vient la phase d'**assemblage** durant laquelle les fusions de transitions sont réalisées pour créer un seul réseau (cf. Figure 25 étape B). A ce stade, le temps (noté t) vaut l'instant initial et le numéro du scénario simulé (noté nsc) vaut 1. Le scénario qui est en cours de simulation est appelé ici **scénario courant**.

Ensuite, vient la phase d'initialisation – du temps, du champ de pression, de la température – (cf. Figure 25 étape C). Durant cette initialisation, les transitions d'initialisation du réseau sont tirées, suite à quoi les variables aléatoires se voient attribuer une valeur pour le scénario courant. Si d'autres transitions sont sensibilisées, alors elles sont tirées (cf. Figure 25 étape D) ; et cette étape est répétée tant qu'il reste des transitions sensibilisées. Si, au cours de cette boucle d'évolution de marquage, l'une au moins des transitions tirées correspond à un événement défini comme étant final (p. ex. : extinction du foyer, sortie du dernier occupant), alors le scénario prend fin. Les résultats physiques le concernant sont sauvegardés (cf. Figure 25 étape G). L'outil SCHEMA-SI passe alors au scénario suivant (le numéro du scénario courant est itéré et le calcul recommence à l'étape C) tant que le nombre de scénarios simulés reste inférieur à la consigne (dont l'ordre de grandeur est de plusieurs milliers de scénarios).

A l'inverse, lorsque toutes les transitions sensibilisées ont été tirées et qu'aucune d'entre elles ne met fin au scénario courant, le scénario courant se poursuit. Pour le marquage courant M, les flux nets échangés entre le gaz et les objets (parois, ouvertures, foyer, etc.) sont calculés (cf. Figure 25 étape E). Comme nous l'avons expliqué précédemment, ce calcul est réalisé grâce aux fonctions continues du réseau de Petri faisant appel à des routines CIFI 2009. Le temps est ensuite itéré d'un pas-de-temps dt et le système d'EDO est intégré, suite à quoi les grandeurs physiques sont connues pour le nouvel instant t (cf. Figure 25 étape F). Tant que cet instant reste inférieur au temps de fin de simulation, la boucle composée des étapes D, E et F est répétée (sauf si un événement met fin au scénario). Enfin, lorsque l'instant courant est supérieur à l'instant de fin de simulation, noté t_f , les résultats physiques sont sauvegardés. L'outil passe à la simulation du scénario suivant ou s'arrête, selon que le nombre de scénarios simulés soit inférieur ou égal à la consigne (notée $nscf$). Si la consigne est atteinte, les résultats événementiels (c.à.d. l'instant du dernier tir de chaque transition) sont sauvegardés (cf. Figure 25 étape H) avant l'arrêt de la simulation.

Après avoir vu des aspects plus techniques liés aux réseaux de Petri, nous allons focaliser sur des aspects plus généraux de systémique.

IV. CONCEPTS ET MÉTHODES UTILISÉS EN ANALYSE SYSTÉMIQUE

La systémique est la discipline qui étudie les systèmes complexes. Par définition, la systémique n'est pas rattachée à un domaine d'étude donné et ses champs d'application vont de la politique à la technologie, en passant par l'informatique, la biologie, l'écologie, l'économie, la sociologie, l'art ou encore l'entreprise. En outre, elle englobe des disciplines, qui, sans elle, paraissent isolées et se caractérise par une forte composante transdisciplinaire. Ainsi la systémique contribue à décloisonner les domaines de compétences.

Tout d'abord, les notions de système et de complexité seront définies (cf. IV.A). Ensuite, les concepts sur lesquels l'approche systémique repose seront abordés (cf. IV.B) afin de terminer par l'énumération et la présentation rapide de méthodes ayant recours à cette approche (cf. IV.C).

IV.A Système et complexité

IV.A.a) Définition d'un système

Le mot système vient du grec « *sustēma* » qui signifie « ensemble, organisation ». Il existe dans la littérature de nombreuses définitions du mot système, redondantes ou complémentaires. Le tableau suivant en propose quelques une, sélectionnées de manière à ce que chacune apporte un

élément supplémentaire par rapport à la précédente. En aucun cas ces définitions ne sauraient être le reflet de la totalité des travaux de l'auteur.

Définition	Référence
« Un système est une totalité organisée , faite d'éléments solidaires ne pouvant être définis que les uns par rapport aux autres en fonction de leur place dans cette totalité. »	(De Saussure, 1995)
[Un système est un] « ensemble d'unités en interrelations mutuelles . »	(Von Bertalanffy, 1993)
« Un système est un ensemble de parties en interaction dynamique , organisées en fonction d'un but »	(De Rosnay, 1975)
« Un système est un ensemble d'objets organisés en fonction d'un but et immergé dans un environnement . »	(Le Gallou, et al., 1992)

La lecture de ces définitions fait intervenir les notions de **parties** (également appelés éléments, unités, objets ou entités selon les auteurs), d'**organisation**, d'**interrelations**, de **dynamique**, de **but** et d'**environnement**. Le modèle du système général, introduit par (Le Moigne, 2006 p. 58), regroupe toutes ces notions et sera utilisé dans la présente recherche. Ce modèle propose une définition d'un système, quelle que soit sa nature, autour des 5 axiomes de base de la Figure 26.

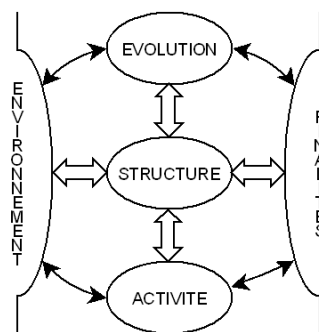


FIGURE 26 : LE SYSTÈME GÉNÉRAL (Le Moigne, 2006)

Ainsi, la définition d'un système passe par l'identification :

- de finalités (celles du système ou de l'observateur) ;
- d'une structure (c'est-à-dire d'un ensemble de parties agencées les unes par rapport aux autres dans l'espace) ;
- d'un environnement (tout ce qui est en dehors des limites du système) ;
- d'une activité (ce qui s'y passe, ce que le système fait) ;
- d'un devenir, d'une évolution (ce que le système sera).

IV.A.b) Distinguo entre système compliqué et système complexe

Deux familles de systèmes peuvent être discernées : d'une part, les systèmes compliqués et d'autre part, les systèmes complexes. Les critères permettant de différencier un système complexe d'un système compliqué sont regroupés dans la référence (Donnadieu, et al., 2002). Il convient de garder à l'esprit que ces critères décrivent deux extrêmes, et que la réalité se situe quelque part entre les deux.

Selon cet auteur, un système complexe est un système :

- **ouvert** : il pratique de nombreux échanges avec son environnement ;
- **relationnel** : il est composé de nombreuses parties fortement interconnectées dont la nature est variée ;
- **englobant** : sa structure est arborescente, hiérarchisée en niveau, en sous-systèmes, et chaque sous-système peut être considéré comme un système de frontières plus restreintes (principe des matriochkas ou de récursivité) ;
- **imprévisible** : ni son fonctionnement (son activité) ni son devenir ne peuvent être prévus avec certitude, et cette imprévisibilité vient de sa capacité à faire émerger des propriétés nouvelles (Morin, 2005) ;
- **auto-organisateur** : il s'adapte à son environnement grâce à la présence de boucles de rétroactions positives (c.à.d. évoluant vers l'amplification) ou négatives (c.à.d. évoluant vers la stabilité) dans son activité ;
- **finalisé** : il a une finalité propre (p. ex. : exister, se maintenir, etc.) qu'il tente d'atteindre par l'enclenchement approprié de diverses procédures de régulation (p. ex. : un écosystème).

En opposition, un système compliqué est un système :

- **fermé** : il n'échange pas ou peu avec son environnement ;
- **non relationnel** : les unités qui le composent sont peu nombreuses et les relations qu'elles entretiennent peuvent être décrites à l'aide de lois simples ;
- **prévisible, déterministe** : il est possible d'appréhender son activité et son devenir de manière certaine ;
- **non finalisé** : sa finalité est celle que l'observateur ou que le concepteur du système veut bien lui donner. Soit il s'agit d'un système technique construit par l'homme pour servir ses intérêts, soit d'un système naturel inerte (p. ex. : une pierre posée sur le sol) ;
- **non-adaptatif** : sans une intervention extérieure, il évoluera fatalement vers la destruction avec un délai plus ou moins long (p. ex. mise au rebut d'un système technique, érosion de la pierre).

Le Tableau 2 propose de mettre en relation les critères de classification de la littérature avec le modèle du système général de (Le Moigne, 2006).

	Système compliqué	Système complexe
Environnement	pas d'interactions entre le système et l'environnement	interactions bilatérales entre le système et l'environnement
Structure	structure isotrope, composée d'unités peu nombreuses et indépendantes les unes des autres	structure variée et hiérarchisée, composée de nombreuses unités interagissant les unes avec les autres
Activité	activité appréhendable, prévisible, déterministe	activité impossible à appréhender, imprévisible, composée de nombreuses rétroactions
Objectif	système non finalisé	système finalisé
Évolution	évolution prévisible	évolution imprévisible (fins alternatives)

TABEAU 2 : CRITÈRES DE CLASSIFICATION DES SYSTÈMES EN SYSTÈME COMPLEXE OU EN SYSTÈME COMPLIQUÉ

Deux types de systèmes ont donc été caractérisés : les systèmes compliqués et les systèmes complexes. L'approche recommandée pour analyser un **système compliqué** est **cartésienne**.

Elle consiste à analyser les parties du système de manière disjointe, et à recomposer le tout à l'aide de lois de composition simples. A l'inverse, l'approche recommandée pour analyser un **système complexe** est **systémique**. L'approche systémique est plus amplement détaillée ci-dessous.

IV.B Approche systémique et science des modèles

IV.B.a) Objectifs, recommandations et fondements

L'approche systémique vise à analyser **conjointement** les différentes parties du système, afin de ne pas détruire les interactions. Pour y parvenir, (Durand, 2010 p. 67) recommande de :

- ne pas viser l'exhaustivité ;
- préférer la lisibilité à la quantité d'information ;
- préférer un schéma à un long discours ;
- utiliser les formes (les symboles) pour caractériser ;
- s'attacher autant au qualitatif qu'au quantitatif ;
- savoir intégrer le flou, l'ambigu, l'incertain, l'aléatoire ;
- réserver des marges d'adaptation ;
- chercher le bon compromis fidélité/simplicité ;
- procéder par itérations ;
- apprendre à bien découper (frontière, niveaux, etc.) ;
- savoir faire des regroupements ou des éclatements.

Enfin, l'approche systémique repose sur trois grands principes (Le Gallou, et al., 1992) : **la notion de système, le développement de modèles** (détaillé et défini au paragraphe suivant) **et le raisonnement analogique**. Selon (Le Gallou, et al., 1992), la **notion de système** (activité, environnement, structure, devenir, finalité) sert de support pour construire **un ou plusieurs modèles**. Dans l'approche systémique, la construction du modèle est tout aussi importante que son utilisation. En outre, si cette construction fait émerger des difficultés, alors les principes de la systémique encouragent à chercher, par analogie, des modèles ou des démarches dans d'autres champs disciplinaires.

En conclusion, l'approche systémique revient à utiliser la notion de système et le raisonnement analogique pour l'élaboration de(s) modèle(s) d'une réalité. Elle est utilisable par toute personne ou organisation, confrontée à un problème transdisciplinaire complexe, rencontrant des difficultés de cohérence, d'organisation ou de définition lors du traitement de ce problème.

IV.B.b) Science des modèles, notamment l'ingénierie dirigée par les modèles

La science des modèles est la branche de la science dont l'objectif est la construction et l'utilisation de modèles. La science des modèles **n'est pas un sous-ensemble de la systémique**, c'est plutôt le domaine dans lequel la systémique a puisé des concepts féconds et inversement.

Définitions

Un **modèle** est une représentation abstraite du phénomène ou de l'objet étudié, construite dans un but défini (p. ex : un plan, un organigramme, un système d'équations). Un modèle est décrit à l'aide d'un langage de modélisation et est construit par l'application d'une méthode de modélisation. Un **langage de modélisation** est un formalisme utilisé pour représenter un modèle (p. ex. : un ensemble de traits, de flèches, de couleurs, de symboles, de nombres, etc. auxquels une signification est associée). Une **méthode de modélisation** se définit alors comme

un ensemble structuré permettant l'élaboration d'un modèle en proposant des opérations à accomplir, en mettant à disposition des outils pour accomplir les opérations et en signalant certains errements à éviter.

Pour qu'un modèle, un langage ou une méthode soit systémique, il faut en outre qu'elle s'appuie sur la notion de système.

Remarque :

Lorsque la correspondance entre le modèle et la réalité est parfaite, le modèle est isomorphe, ce qui correspond au cas idéal. Dans le cas contraire, le modèle est dit homomorphe, ce qui correspond au cas courant.

Ingénierie dirigée par les modèles

L'ingénierie dirigée par les modèles (IDM³⁶) est un domaine de l'informatique mettant à disposition des outils, des concepts et des langages pour **créer et transformer des modèles** (Thiry, et al., 2010), (Thiry, et al., 2009). L'intérêt est d'éviter de construire un modèle de A à Z en réutilisant et transformant les concepts d'un autre modèle. En effet, le gros atout de l'IDM est la génération automatique d'un modèle à partir d'un autre. Toutefois, pour qu'un modèle A puisse être transformé en un modèle B, il faut que les langages de modélisation A' et B' soient capables de traduire les mêmes concepts, et que les règles de passage d'un langage à un autre soient clairement spécifiées.

Une approche systémique, dont l'objectif est la modélisation d'un système complexe avec une forte composante transdisciplinaire, à tout intérêt à avoir recours à une discipline qui fournit les outils nécessaires pour organiser les modèles multivues, multiéchelles, multireprésentations et multiformalismes rendant compte de la complexité des systèmes.

IV.C Zoom sur quelques méthodes de modélisation systémique

La littérature systémique propose des méthodes de modélisation, plus ou moins bien formalisées. En effet, certaines sont pleinement opérationnelles tandis que d'autres sont plutôt au stade de l'ébauche de concepts. Toutefois, quel que soit leur stade de formalisation, ces méthodes (ou ébauches de méthodes) ont apporté des concepts, des outils ou des démarches féconds. Les méthodes présentées ci-après sont celles qui ont eu un rôle dans la construction des présents travaux ou celles dont la puissance modélisatrice semblait suffisamment importante pour qu'une courte citation ait sa place.

IV.C.a) La systèmographie

La systèmographie est l'œuvre de Jean-Louis Le Moigne, ingénieur de l'école centrale de Paris et professeur émérite à l'université d'Aix Marseille. Il a développé la systèmographie dans son ouvrage (Le Moigne, 2006).

La systèmographie est un terme introduit pour faire un parallèle avec la photographie. La photographie est un procédé de capture d'images d'un objet réel faisant intervenir un appareil photographique. Après développement, le résultat du procédé est la photographie (l'image porte le même nom que le procédé mis en œuvre pour l'obtenir). En quelque sorte, une photographie

³⁶ En anglais MDE pour Model Driven Engineering

est un modèle, à un instant donné, de l'objet réel. La systèmographie est un procédé qui permet de générer un modèle à partir d'un objet réel. Comme l'illustre la Figure 27, **l'appareil photographique utilisé pour réussir une systèmographie est le système général** (cf. Figure 26). Sur cette figure, un rappel du système général est proposé à gauche et le principe de la systèmographie à droite. Dans ce principe, le système général apparaît au centre, à la croisée des segments. Concrètement, selon (Le Moigne, 2006), il faut utiliser les cinq axes du système général pour « photographier » un phénomène réel.

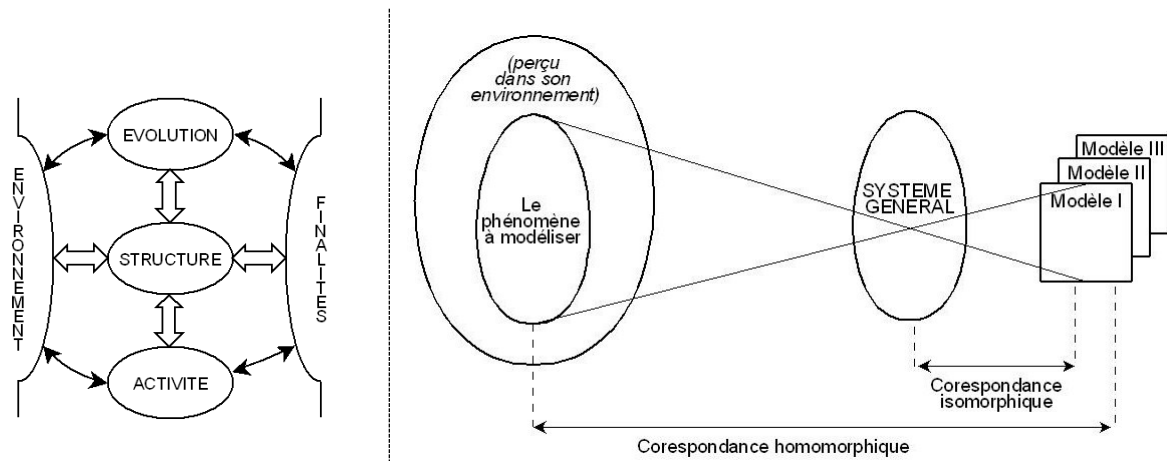


FIGURE 27 : PRINCIPE DE LA SYSTÈMOGRAPHIE (À DROITE) ET SYSTÈME GÉNÉRAL UTILISÉ DANS LA SYSTÈMOGRAPHIE (À GAUCHE)

Pour construire et représenter ces modèles, de nombreux concepts ont été introduits, notamment celui de **boîte noire** et de **processus** (Le Moigne, 2006). Le modèle de la boîte noire consiste à représenter le système, ainsi que les sous-systèmes comme des boîtes. Chaque boîte, ou objet, a deux comportements possibles :

- elle reçoit d'autres objets, et les restitue après transformations : c'est alors un objet changeur ou « objet processeur »
- elle est reçue par un autre objet, et est restituée après transformations : c'est alors un objet changé ou « objet traité »

Aux transformations, Le Moigne associe la notion de **processus**. Un processus est « l'ensemble ordonné des changements affectant (...) une famille au moins d'objets identifiés ». Ces objets peuvent être de nature physique (de la matière ou de l'énergie) ou plus abstraite (de l'information). L'activité d'un système complexe se caractérise par de nombreux processus interagissant les uns avec les autres. L'ensemble de ces interactions peut être représenté sous forme d'une matrice I qui est binaire et carrée, de dimensions $N \times N$, avec N , le nombre de processus. L'élément I_{ij} vaut 1 si le processus i interagit avec le processus j et 0 dans le cas contraire.

IV.C.b) Le microscope

Le microscope est un outil imaginaire inventé par J. De Rosnay pour construire des modèles graphiques et mathématiques (De Rosnay, 1975). Le microscope n'est pas suffisamment formalisé pour atteindre le stade de méthode de modélisation, mais propose tout de même le recours à la description suivante du système :

Point de vue structurel :

- une **limite** ;
Qui est la frontière entre le système et l'environnement.

- des **éléments** ;
Pouvant être identifiés, dénombrés et classés en familles ou catégories. La matière, l'énergie ou l'information sont des exemples de familles.
- des **réservoirs** ;
Dans lesquels les éléments sont rassemblés et permettent de stocker des éléments (de la matière, de l'énergie).
- un **réseau de communication**.
Constitué par l'ensemble des supports qui permettent le transit de matière, d'énergie et d'information entre les réservoirs et les différents constituants du système.

Point de vue fonctionnel :

- des **flux** ;
Qui sont les débits d'énergie, de matière ou d'information qui transitent via les réseaux de communication.
- des **vannes** ;
Représentant des centres de commandes des flux et qui permettent d'en augmenter ou d'en diminuer le débit.
- des **boucles de rétroaction** ;
Permettant de contrôler les débits en amont ou en aval d'un réservoir.
- des **délais**.
Résultant des vitesses de circulation des éléments, de leur durée de stockage ou encore de l'intervalle temporel entre la commande (au niveau des vannes) et l'exécution (modification effective du débit).

À cette description textuelle est associée une ébauche de langage de modélisation graphique. La Figure 28 présente un exemple de modèle obtenu avec ce langage.

LÉGENDE :

-  limite
-  réseau de connexion – flux d'éléments
-  réseau de connexion – flux d'information
-  réservoir
-  vanne
-  source/puits d'éléments

Remarque :

Nous avons ajouté la limite à ce schéma.

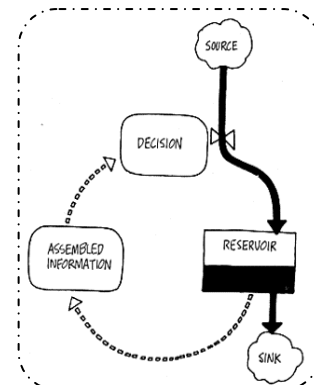


FIGURE 28 : MODÈLE GRAPHIQUE PROPOSÉ DANS LE MACROSCOPE (DE ROSNAY, 1975)

IV.C.c) La méthode MADS

La méthode MADS (Méthode d'Analyse de Dysfonctionnement des Systèmes) (Lesbats, et al., 1993), (Université de Bordeaux, 2010) permet d'identifier *a priori* l'enchaînement des événements qui conduit à un événement non souhaité (E.N.S.). Selon (Perilhon, 2003), la méthode MADS peut apparaître comme le **modèle théorique de l'AMDEC**³⁷.

³⁷ AMDEC est l'acronyme d'Analyse des Modes de Défaillance Et de leur Criticité

Pour parvenir à identifier les enchaînements d'événements conduisant à un E.N.S., la méthode MADS s'appuie sur la notion de **processus de danger**. Le processus de danger est un **modèle systémique événementiel représentant le danger**. Ce modèle (cf. Figure 29), reposant sur la notion de processus introduite par (Le Moigne, 2006), est composé de deux systèmes, appelés respectivement système source de danger et système cible de danger. Les deux systèmes sont en interaction et immergés dans un environnement. Les interactions entre eux se conceptualisent sous la forme d'un flux de danger (dit processus de danger). Ce flux est émis par le système source, lorsqu'un événement initiateur le génère. S'il atteint le système cible, le **risque est réalisé. C'est l'événement non souhaité**.

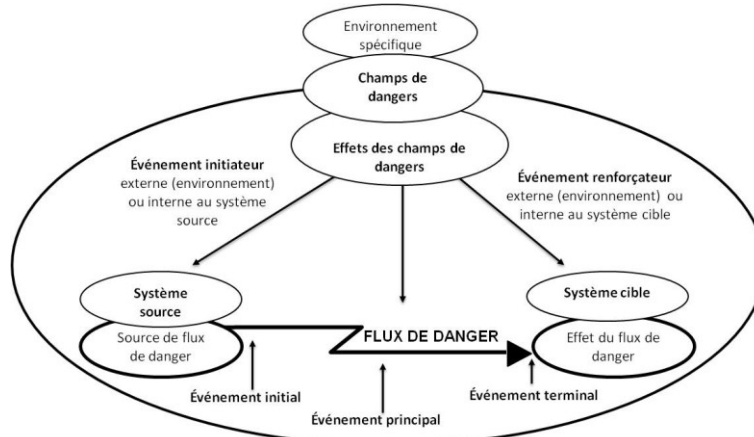


FIGURE 29 : LE MODÈLE DU PROCESSUS DE DANGER

Dans ce modèle, l'E.N.S. est donc le fruit de l'enchaînement des événements suivants :

- événement initiateur (le déclencheur) ;
- événement initial (la naissance du flux de danger) ;
- événement principal (la propagation du flux de danger) ;
- événement terminal (l'impact du flux de danger sur la cible).

À cet E.N.S. peut être associé une fréquence d'occurrence (produit des fréquences d'occurrence des événements de l'enchaînement). Cette fréquence peut être diminuée par des barrières ou augmentée par des défaillances (événement renforceur).

IV.C.d) La méthode MOSAR

La méthode MOSAR (Méthode Organisée Systémique d'Analyse de Risque), développée au CEA par (Perilhon, 2003) permet l'analyse des risques techniques d'une installation humaine et l'identification des moyens de prévention nécessaires pour les neutraliser. Elle s'applique aussi bien dès la conception d'une installation nouvelle qu'au diagnostic d'une installation existante. Elle comprend deux modules, le module A, qui sert à identifier les risques et le module B, qui sert à les analyser. Les modules proposent des notions et des outils, dont certains sont détaillés ci-après.

Module A

L'identification des risques dans le module A repose sur les notions principales suivantes :

- le sous-système (cf. IV.A.b) ;
- le processus de danger de MADS (cf. IV.C.c) ;
- le concept de la boîte noire (cf. IV.C.a) ;
- l'enchaînement de processus, qui est un cas particulier d'interactions entre processus (cf. IV.C.a).

Toutes ces notions sont issues ou dérivées de (Le Moigne, 2006).

Concrètement, pour identifier des scénarios d'accidents (module A), les opérations à accomplir sont, dans l'ordre :

- découper le système en **sous-systèmes** ;
- identifier dans chaque sous-système les **processus de danger** (à l'aide du modèle MADS et de grilles pré-remplies de sources de danger) ;
- considérer chaque sous-système comme une **boîte noire**, dont les entrées sont les événements initiateurs des processus de danger qu'il contient (p. ex. : choc) et les sorties sont les événements principaux de ces mêmes processus de danger (p. ex. : fuite propane) – cf. Figure 30 ;
- construire les **enchaînements de processus** dans chaque sous-système. L'enchaînement est construit en identifiant les événements principaux d'un processus de danger qui sont également événements initiateurs d'un autre processus de danger. Les enchaînements de processus peuvent alors être représentés sous forme arborescente (arbre logique ou arbre d'événements) et traduisent des scénarios d'accidents courts – cf. Figure 31 ;
- construire les **enchaînements de processus** d'un sous-système à l'autre, ce qui a pour effet de construire des scénarios d'accidents longs – cf. Figure 32.

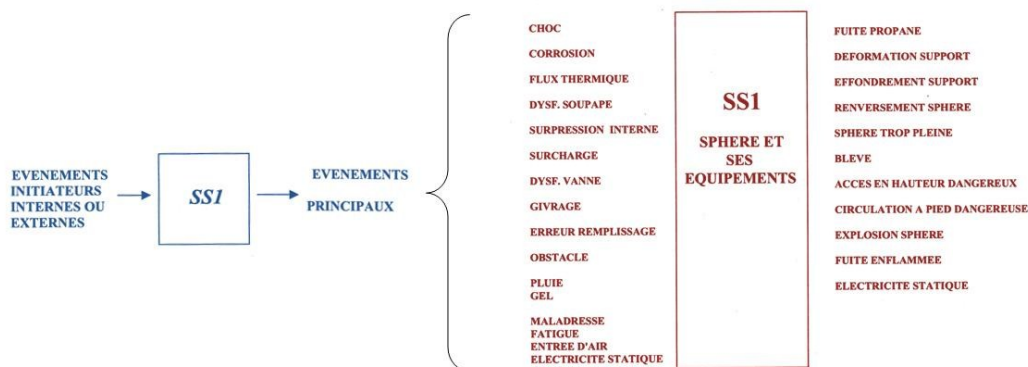


FIGURE 30 : MISE D'UN SOUS-SYSTÈME SOUS FORME DE BOÎTE NOIRE – THÉORIE (EN BLEU) ET EXEMPLE (EN ROUGE)

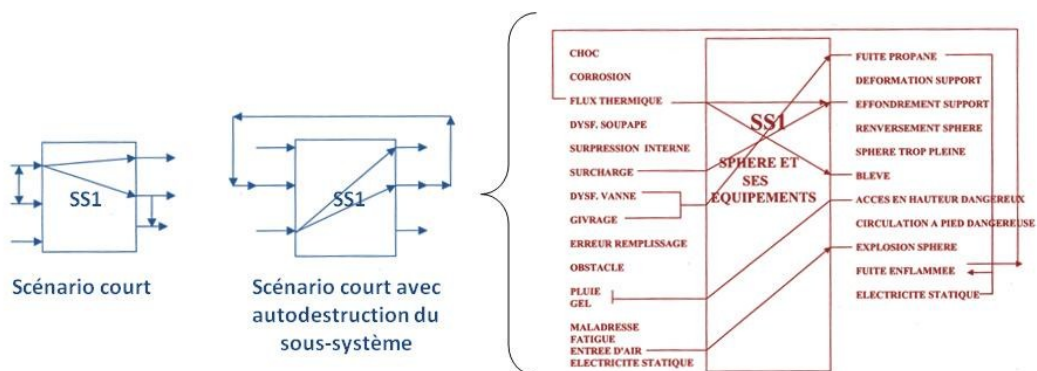


FIGURE 31 : CONSTRUCTION DE SCÉNARIOS COURTS PAR ENCHAÎNEMENTS DE PROCESSUS – THÉORIE (EN BLEU) ET EXEMPLE (EN ROUGE)

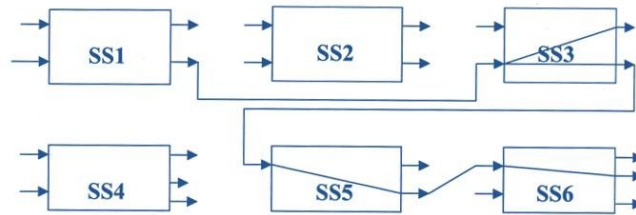


FIGURE 32 : CONSTRUCTION DE SCÉNARIOS LONGS PAR ENCHAÎNEMENTS DE PROCESSUS – THÉORIE

Module B

L'analyse des risques dans le module B repose sur le travail réalisé dans le module A et sur les outils suivants :

- SADT³⁸ (Santarek, et al., 1998) ;
- AMDEC³⁹ (Ridoux, 1999) ;
- ADD⁴⁰ (Mortureux, 2002) ;
- HAZOP⁴¹ (Royer, 2009).

Ces outils, classiquement utilisés dans le domaine de la gestion des risques, n'ont pas été utilisés dans la présente thèse.

IV.C.e) Les méthodes dérivées des méthodes MADS-MOSAR et leurs apports

Les concepts des méthodes MADS et MOSAR ont été réutilisés dans d'autres méthodes d'analyse de risques. Par rapport aux méthodes mères, ces nouvelles méthodes filles ouvrent la voie vers la modélisation numérique.

La méthode d'Audrey Dassens

La méthode d'Audrey Dassens (Dassens, 2007) vise à analyser les risques dans un système sociotechnique de type « entreprise ». La puissance de sa méthode vient :

- de la prise en compte des risques d'origine humaine, technique et environnementale ;
- de la prise en compte des interactions entre ces risques ;
- de la représentation des effets domino ;
- de l'identification des événements clefs dans les scénarios de risque.

Pour y parvenir, sa méthode reprend les concepts de processus de danger et d'enchaînement de processus de la méthode MADS auxquels elle ajoute la notion de matrice d'interaction (Le Moigne, 2006) (Godet, 2007). Autrement dit, les processus de danger représentent les différents risques et leurs enchaînements les effets domino. Les matrices d'interactions, représentant ces enchaînements, sont utilisées pour mettre en évidence **les niveaux de dépendance** (combien chaque processus a de processus parents ?) et d'influence (combien chaque processus a de processus enfants ?). Ensuite, le recours au calcul matriciel pour élever ces matrices à la

³⁸ SADT est l'acronyme de Structured Analysis and Design Technic, dit analyse fonctionnelle descendante en français

³⁹ AMDEC est l'acronyme d'Analyse des Modes de Défaillance Et de leur Criticité

⁴⁰ ADD est l'acronyme d'Arbres Des Défaillances

⁴¹ HAZOP est l'acronyme d'HaZard and OPerability study

puissance n permet d'obtenir des arbres généalogiques de processus de danger et ainsi de faire apparaître ceux dont il faut absolument éviter l'occurrence.

Les limites de cette méthode proviennent de l'absence de prise en compte du temps et des fréquences d'occurrence de processus de danger.

La méthode d'Olivier Thibaut

Olivier Thibaut (Thibaut, et al., 2009) reprend la démarche de (Dassens, 2007) et l'applique à un système sociotechnique de type « territoire ». Il adjoint à la démarche l'utilisation des réseaux de Petri stochastiques temporisés pour modéliser les processus de danger et leurs enchaînements. Il met donc en évidence le parallèle entre le modèle MADS et les réseaux de Petri stochastiques temporisés.

La méthode de Julien Chorier

La méthode de Julien Chorier (Chorier, 2007) vise à évaluer le risque incendie dans une construction. Sa méthode utilise certaines étapes du module A de la méthode MOSAR puisque la démarche consiste à :

- définir des enjeux, les hiérarchiser et définir les dommages acceptés sur ces enjeux (seuil d'acceptabilité) ;
- découper le système en sous-systèmes ;
- recenser dans chaque sous-système les parties jouant un rôle dans la sécurité (p. ex. : les occupants, les équipements de sécurité, etc.) ;
- identifier des scénarios de feu (cinétique de foyer, enfumage des locaux, position du foyer, etc.) ;
- modéliser les conséquences des scénarios de feu en utilisant les réseaux de Petri stochastiques temporisés ;
- utiliser les outils d'aide à la décision (Bouyssou, 2006) pour valider une configuration de sécurité.

Il est important de noter que contrairement aux deux méthodes précédentes, Chorier n'utilise pas le modèle MADS, mais des tables d'identification des données nécessaires à l'utilisation des réseaux de Petri. Dans sa méthode, les réseaux de Petri sont déjà construits, ce qui limite les possibilités de décrire la variabilité des situations possibles.

La méthode MACR

La méthode MACR⁴² est une méthode extrêmement puissante née à la BSPP (Raclot, et al., 2010). Étant donné qu'elle date de 2010, les concepts et les outils apportés n'ont pas pu être utilisés dans la présente thèse. MACR sert dans le champ de l'analyse des risques sur un territoire géographique. Ses objectifs sont de :

- concevoir un outil de modélisation permettant de réaliser une cartographie des zones de danger ;
- élaborer des scénarios d'accidents et chiffrer leur occurrence, en fonction de la zone étudiée ;
- identifier les zones à risque pour lesquelles il faudrait renforcer la couverture opérationnelle.

⁴² MACR est l'acronyme de Méthode d'Analyse et de Couverture des Risques

Grosso modo, MACR consiste en un mélange amélioré de MADS-MOSAR et de la méthode de Dassens, le tout couplé avec un SIG (système d'information géographique). Dans MACR, le sous-système de référence est une tuile de SIG⁴³ (un carré dans l'espace) et dans chaque tuile, les processus de danger sont identifiés et leur fréquence d'occurrence est définie. Les enchaînements de processus de danger dans une tuile ou entre différentes tuiles sont ensuite identifiés et là encore, les fréquences d'enchaînements sont définies (on entre donc dans le champ des « probabilités » conditionnelles). Enfin, des matrices stochastiques sont utilisées pour calculer en temps réel le niveau de risque dans l'espace, et ce niveau évolue en fonction de la réalisation des processus de danger.

⁴³ SIG est l'acronyme de Système d'Information Géographique

Deuxième chapitre : RÉFLEXION SUR UNE MÉTHODE IDÉALE ET CONSTRUCTION D'UN ITINÉRAIRE DE RECHERCHE

OBJECTIFS DU CHAPITRE :

L'objectif de ce chapitre est de :

- *réfléchir à ce que serait une méthode idéale intégrant l'outil de simulation SCHEMA-SI ;*
- *définir, parmi les tâches à entreprendre afin de construire cette méthode, un sujet de recherche doctorale ;*
- *mettre en évidence un itinéraire de recherche pour traiter ce sujet.*

MÉTHODOLOGIE :

Pour imaginer une méthode idéale, l'état de l'art en matière de méthodologie ISI a été croisé avec le retour d'expérience accumulé au CSTB.

Ensuite, nous avons cherché à définir un sujet de recherche dont le travail associé puisse faire l'objet d'une thèse et dont le besoin semble suffisamment important pour être traité en premier parmi diverses actions potentielles.

Enfin, pour construire un itinéraire de recherche, nous avons :

- défini clairement l'objectif de la thèse ;
- cherché un positionnement méthodologique pour y parvenir, c'est-à-dire que nous avons défini les champs dans lesquels les connaissances doivent être extraites ;
- construit un itinéraire de recherche pour traiter le sujet (c'est-à-dire définir une marche à suivre).

I. RÉFLEXION SUR CE QUE SERAIT UNE MÉTHODE IDÉALE INTÉGRANT L'OUTIL DE SIMULATION SCHEMA-SI

I.A Logique et objectif d'une étude d'ISI en général

Une étude d'ISI vise à proposer des mesures de sécurité à mettre en place et à en déterminer la performance. Pour y parvenir, une telle étude repose sur l'évaluation du risque incendie encouru (par les personnes, les biens, l'environnement...). Évaluer ce risque revient à se poser des questions dont quelques exemples sont regroupés dans le Tableau 3.

EXEMPLES D'INTERROGATIONS NÉCESSAIRES POUR ÉVALUER LE RISQUE INCENDIE		
<i>E.N.S. (événement non souhaité)</i>	<i>Prévision de l'E.N.S. (composantes F et G du risque) ⁴⁴</i>	<i>Définition de critères d'acceptabilité (composante A du risque)</i>
- perte de la vie des personnes sinistrées par un incendie	- comment compter <i>a priori</i> les décès en cas d'incendie ? Comment évaluer la fréquence de cet E.N.S. ?	- combien de décès suite à un incendie sont acceptés ? Avec quelle fréquence cet E.N.S. est-il accepté ?
- dégradation de la santé des personnes sinistrées par un incendie	- comment évaluer <i>a priori</i> l'occurrence et l'importance d'un handicap physique et/ou moral sur des personnes sinistrées ? Comment évaluer la fréquence de cet E.N.S. ?	- combien de personnes blessées suite à un incendie peut-on accepter ? Quelle est l'étendue du handicap tolérée ? Avec quelle fréquence cet E.N.S. est-il accepté ?
- dommages environnementaux suite à un incendie	- comment chiffrer <i>a priori</i> les dommages faits à l'environnement et/ou au patrimoine historique ? Comment évaluer la fréquence de cet E.N.S. ?	- quelles concentrations de polluants sont acceptées dans l'eau ? dans l'air ? Quelle œuvre accepte-t-on de voir détruite par un incendie ? Avec quelle fréquence cet événement est-il accepté ?
- dégradation de l'image de marque suite à un incendie	- comment quantifier <i>a priori</i> l'impact médiatique d'un incendie ? Comment évaluer la fréquence de cet E.N.S. ?	- quelle perte d'image de marque est tolérée ? Avec quelle fréquence cet événement est-il accepté ?

TABLEAU 3 : EXEMPLES DE QUESTIONS ILLUSTRANT LA DIFFICULTÉ D'ÉVALUER LE RISQUE INCENDIE

De manière synthétique, nous pouvons affirmer que pour réussir une évaluation du risque, il est nécessaire de :

- définir des E.N.S. ;
- déterminer des seuils à partir desquels un E.N.S. est considéré comme réalisé ;
- déterminer les scénarios à étudier ;
- vérifier si un ou plusieurs E.N.S. apparaissent lors de ces scénarios ;
- déterminer des critères d'acceptabilité d'E.N.S.

Tout au long du paragraphe I.B, nous allons voir, au travers des phases d'une méthode idéale, comment entreprendre ces actions.

⁴⁴ Rappel : F= fréquence, G=gravité, A= acceptabilité. Pour plus d'informations, se reporter au paragraphe I.A du premier chapitre.

I.B Proposition d'une méthode idéale

L'élaboration de méthodes d'ingénierie de la sécurité incendie a fait l'objet de travaux dans le cadre d'un projet national (PN-ISI G1, 2008) et d'un projet Européen (DFHCM, 2005). Ces méthodes ont pour objectif la conduite d'un projet d'ISI, c'est-à-dire de proposer et d'évaluer la performance de mesures de sécurité à mettre en place dans un établissement.

Dans le but de donner naissance à l'ébauche d'une méthode spécifique à SCHEMA-SI, trois actions ont été entreprises. Premièrement, les contenus des deux méthodes (PN-ISI G1, 2008) et (DFHCM, 2005) ont été fusionnés. Deuxièmement, un parallèle entre la méthode résultante et les concepts communément utilisés dans le domaine des sciences du risque a été proposé. Troisièmement et dernièrement, des considérations spécifiques à l'utilisation de SCHEMA-SI ont été identifiées et parsèment le présent paragraphe. La méthode résultant de ce triple processus est appelée ici méthode idéale, car de nombreuses actions de recherche sont nécessaires pour la finaliser. La démarche, qui n'est autre que l'organisation de la méthode (au sens de l'ordre des actions à entreprendre), est schématisée dans la Figure 33 et cette figure est commentée tout au long des paragraphes à venir.

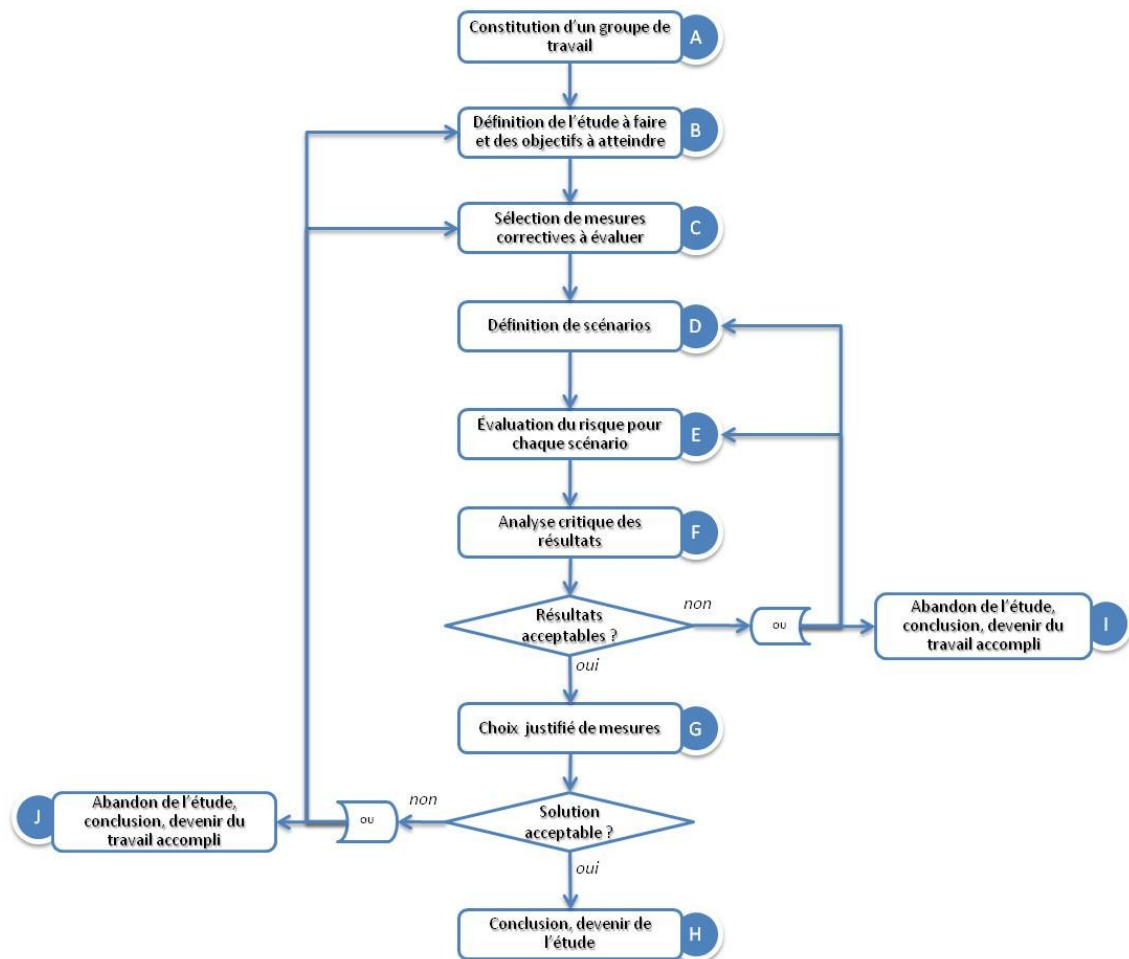


FIGURE 33 : ORGANISATION D'UNE MÉTHODE IDÉALE

I.B.a) Constitution d'un groupe de travail

Ce paragraphe se rapporte à la phase A de la Figure 33.

Toute étude d'ISI doit débuter par la constitution d'un groupe amené à travailler de façon collective et coordonnée sur le projet. Le groupe de travail, sa composition ainsi que le degré de confiance que les acteurs s'accordent jouent un rôle essentiel dans la conduite d'un projet. En effet, une équipe est avant tout constituée d'individus, et chacun se caractérise par ses buts propres (plus ou moins conscients d'ailleurs), par ses peurs et par sa manière d'interagir avec les autres (capacité à s'exprimer, capacité à comprendre et à accepter les modes d'expression des autres, etc.).

Afin de limiter les dysfonctionnements au sein du groupe de travail (p. ex. : mauvaise qualité du travail, refus des solutions proposées, mauvaises dispositions pour les études futures à mener ensemble), le recours à des méthodes spécifiques peut être envisagé. Peuvent être citées, la méthode PAT-Miroir (Le Cardinal, et al., 1994) et la méthode des cindyniques (Kervern, et al., 2007). PAT-Miroir a été mise au point par l'université technologique de Compiègne dans l'optique de construire de la coopération au sein d'une équipe. Les cindyniques, une méthode d'analyse des risques, peuvent être appliquées pour l'analyse du risque d'échec de la coopération au sein d'un groupe.

I.B.b) Définition de l'étude à accomplir et des objectifs à atteindre

Ce paragraphe se rapporte à l'étape B de la Figure 33.

Tout travail devrait normalement débuter par une définition explicite et concomitante :

- du cadre de l'étude ;
- des objectifs de l'étude ;
- de la manière dont l'étude devrait se dérouler.

Cadre de l'étude

Toute étude devrait débuter par l'identification du cadre dans lequel elle s'inscrit. Ce cadre se définit principalement par les personnes ou organisations qui la demandent, qui la financent, qui la suivent ou qui éventuellement l'arbitrent.

Objectifs

Une étude de sécurité incendie présente deux types d'objectifs :

- des objectifs de sécurité incendie (le travail à accomplir) ;
- des objectifs stratégiques (les contraintes à respecter pour satisfaire au mieux les demandeurs et les décideurs lors de la réalisation de ce travail).

D'une part, les objectifs de sécurité incendie d'une étude d'ISI sont regroupés dans le tableau suivant, issu de (PN-ISI G1, 2008).

Objectifs fondamentaux	Sous-objectifs
Protection de la santé et de la vie	Les occupants
	Les tiers (voisinage)
	Les services de secours

Objectifs fondamentaux	Sous-objectifs
Préservation de l'environnement	Le sol et les nappes phréatiques
	L'atmosphère
Sauvegarde des biens	Les biens mobiliers et immobiliers de l'ouvrage
	Les biens mobiliers et immobiliers des tiers
	La capacité opérationnelle
	Les fonctions stratégiques
	Le patrimoine architectural, culturel et historique
	L'image de marque

TABLEAU 4 : OBJECTIFS FONDAMENTAUX ET SOUS-OBJECTIFS DE SÉCURITÉ INCENDIE

D'autre part, les objectifs stratégiques sont de nature **financière** (p. ex. : coût des travaux, coût de la conception), **politique** (p. ex. : la volonté d'un élu) et **liés à des intérêts spécifiques** (p. ex. : fabricant souhaitant vendre un équipement de sécurité particulier, association de riverains souhaitant empêcher l'implantation d'un site). En outre, il convient également d'ajouter à cette liste **des objectifs inhérents à l'étude et au groupe de travail** (p. ex. : durée de l'étude, coût de l'étude, charge de travail occasionnée par l'étude, etc.).

En conclusion, la difficulté de la réalisation d'une étude provient en partie de la multitude d'objectifs mis en jeu, ainsi que des potentielles incompatibilités entre les objectifs. La gestion de ces incompatibilités passe nécessairement par l'aboutissement de compromis.

Déroulement de l'étude

Établir le déroulement de l'étude revient à clairement identifier les actions à entreprendre, à les répartir entre les acteurs et à définir un calendrier prévisionnel à respecter. A ce stade, il convient en outre de définir des correctifs si ce calendrier n'est pas respecté et, si possible, d'envisager d'autres actions en cas de blocage de certaines d'entre elles.

Parallèle avec les concepts du risque

D'une manière générale, le parallèle avec le vocabulaire du risque, introduit dans le premier chapitre, peut être utilisé pour élargir le débat. Dans ce cas, définir les **objectifs** d'une étude revient à en définir les **enjeux**. La non-atteinte d'un objectif devient alors un **E.N.S.** (p. ex. : mise en péril de la vie, du patrimoine ou de l'environnement, retard dans l'étude, mécontentement des élus...). Pour prédire l'occurrence d'un E.N.S., il est nécessaire de définir explicitement **des critères de réalisation d'E.N.S.** Par exemple, « la température dépasse la valeur seuil de T pendant une durée de t » est un exemple de critère de réalisation de l'E.N.S. « décès ».

Enfin, **l'évaluation du risque, et donc celle de la performance**, passe par la **détermination de la fréquence d'occurrence de chaque E.N.S., de sa gravité et de son acceptabilité**. Lorsque les enjeux sont **des objectifs stratégiques**, des outils pour réaliser cette évaluation sont à chercher dans le domaine du **management de projet**. A l'inverse, lorsque les enjeux sont **des objectifs de sécurité**, les réponses sont à chercher dans les **sciences du risque**. Dans ce domaine précis, l'ISI recommande l'usage de la simulation numérique, afin de prédire l'évolution des phénomènes dangereux et leur impact potentiel sur les enjeux préalablement définis. SCHEMA-SI permet notamment d'évaluer les fréquences d'occurrence d'E.N.S. Dans la suite de la démarche, nous focaliserons sur les objectifs de sécurité et sur les E.N.S. qui leur sont associés.

I.B.c) Sélection des mesures correctives à évaluer et construction de stratégies de sécurité

Ce paragraphe se rapporte à la phase C de la Figure 33.

Le choix *a priori* des mesures correctives à évaluer repose sur :

- les mesures préconisées par la réglementation prescriptive actuelle ;
- les mesures mises en œuvre actuellement dans l'établissement, si celles-ci sont différentes des prescriptions réglementaires actuelles (ce qui est possible en vertu du principe de non-rétroactivité expliqué au paragraphe II.A.b) du premier chapitre ;
- les retours d'expériences disponibles sur l'établissement concerné ou sur des établissements similaires ;
- les propositions originales des acteurs du projet en guise de mesures compensatoires.

Les mesures peuvent tant être de nature technique qu'organisationnelle, comme l'illustre le paragraphe qui leur est consacré dans le premier chapitre. Ces mesures sont ensuite regroupées en « bouquet » de mesures pour construire **des stratégies de sécurité**. Dans une même stratégie, des mesures incompatibles ne devraient pas coexister, à moins que l'on ne cherche à évaluer avec quel degré elles se font concurrence.

I.B.d) Définition de scénarios

Ce paragraphe se rapporte à la phase D de la Figure 33.

Dans la réalité, de nombreux scénarios d'incendie peuvent survenir. L'étude de l'ensemble des scénarios possibles n'est pas envisageable, puisque cerner totalement *a priori* l'ensemble des futurs possibles est mathématiquement impossible. Il convient donc de n'étudier qu'un nombre réduit de scénarios. A ce stade, deux approches s'opposent.

La première cherche à définir uniquement un nombre très réduit de scénarios, et applique une méthode déterministe pour les étudier. Dans ce cas, le choix des scénarios à étudier est particulièrement compliqué car différents critères de sélection sont tout à fait justifiables (faut-il considérer le scénario que l'on imagine être le plus fréquent ou le plus grave ? Et comment en estimer *a priori* cette fréquence et cette gravité ?).

La seconde tente de définir un nombre important de scénarios et applique une méthode probabiliste pour les étudier. C'est l'approche retenue pour l'outil de simulation SCHEMA-SI. Dans ce cas, les scénarios sont construits automatiquement en fonction des paramètres ayant une influence sur le déroulement de l'incendie. Comme cela est précisé dans le paragraphe III du premier chapitre, l'ensemble de ces paramètres est regroupé dans ce que l'on appelle ici **la trame**. Les paramètres influents de cette trame sont relatifs aux points suivants :

- les caractéristiques de départs de feu potentiels ;
- l'ensemble des séquences de développement et de propagation susceptibles d'avoir lieu après le démarrage du feu ;
- les facteurs favorables et aggravants pour chacune de ces phases ;
- le comportement humain ;
- les actions du système de sécurité ;
- les conséquences sur les cibles ;
- la défaillance des équipements de sécurité ;
- les fins potentielles de scénario (p.ex. : arrivée de secours, extinction du feu).

Difficultés rencontrées lors de la construction d'une trame

Toutefois, la construction de cette trame présente des difficultés de deux types.

Premièrement, des difficultés sont liées à la pose d'hypothèses. En effet construire une trame revient à poser un certain nombre d'hypothèses dont la pertinence doit être vérifiée. Pour préserver un maximum de pertinence, la construction de cette trame devrait s'appuyer sur les différentes techniques suivantes :

- l'utilisation de données validées publiées dans la littérature ;
- le retour d'expérience ;
- l'exploitation de données statistiques ;
- l'avis d'experts ;
- le dialogue entre les acteurs du projet.

Deuxièmement, la trame construite doit être compatible avec l'outil ou les outils de simulation utilisé(s). Avec SCHEMA-SI, cette compatibilité est assurée uniquement si les conditions suivantes sont respectées :

- la trame est exprimée sous la forme de réseaux de Petri prédicat-transition différentiel orienté objet ;
- les séquences d'événements impossibles sont évitées, en imposant des contraintes de séquençage et en construisant la trame au mieux ;
- la précision de la recherche, les critères retenus ainsi que les phénomènes étudiés sont en adéquation avec le domaine de validité de l'outil de calcul utilisé. Par exemple, les hypothèses posées sont compatibles avec le modèle physique de zones (locaux parallélépipédiques, foyers placés en partie basse du local et assez puissants par rapport aux dimensions du local ...).

En conclusion, une méthode idéale pour SCHEMA-SI devrait permettre à un groupe de travail de dialoguer autour de la construction d'une trame afin d'y injecter à la fois leur savoir propre et le savoir collecté au travers des retours d'expérience, de la littérature ou encore des données statistiques. Enfin, cette méthode idéale devrait également permettre aux acteurs de ce projet d'exprimer cette trame à l'aide de réseaux de Petri, tout en ayant l'assurance de leur parfaite compatibilité avec l'outil SCHEMA-SI.

Difficultés liées aux approches probabilistes

Lorsqu'une approche probabiliste est utilisée, de nombreux scénarios sont simulés sur ordinateur(s) à partir de la trame initiale. La représentativité de ces scénarios dépend fortement de la qualité des données introduites dans la trame, du nombre de scénarios simulés et d'éventuelles instabilités numériques. Idéalement, une réflexion quant à ces facteurs limitant devrait être entreprise.

I.B.e) Recherche de situations de danger pour chaque scénario

Ce paragraphe se rapporte à la phase E de la Figure 33.

Une fois les scénarios sélectionnés, il convient de rechercher dans ces scénarios, des situations de danger pour les enjeux préalablement définis (cf. I.B.b). En ISI, la simulation numérique est utilisée pour représenter les phénomènes dangereux à l'aide de modèles physiques allant de la simple formule de corrélation aux volumes finis en passant par les modèles de zones. Les outils de simulation doivent avoir été soumis, de manière concluante, à une procédure de vérification et de validation, précisant leur domaine d'application. De même, il est recommandé d'estimer l'incertitude sur les résultats produits par la méthode de calcul afin de respecter une précision et une fiabilité suffisante au regard des critères de performance établis. Sur ce point, des travaux restent à poursuivre.

En parallèle, les résultats de ces simulations sont confrontés aux critères de réalisation d'E.N.S. pour déterminer si ces phénomènes entraînent ou non la réalisation de ces événements, et si oui à quel moment ils surviennent. Le travail restant à accomplir à ce stade revient donc à identifier et à dater les E.N.S. survenus pour chaque stratégie et pour chaque scénario. Lorsque les scénarios sont nombreux comme c'est le cas avec SCHEMA-SI, ce comptage devrait idéalement être automatisé.

Remarque :

SCHEMA-SI offre la particularité d'évaluer l'occurrence des E.N.S. pendant la construction d'un scénario. Les étapes D et E de la Figure 33 sont donc concomitantes (à l'exception de la définition de la trame qui a lieu en amont).

I.B.f) Analyse critique des résultats et évaluation de leur acceptabilité

Ce paragraphe se rapporte à la phase F de la Figure 33 ainsi qu'à la phase de questionnement entre la phase F et la phase G.

Dans cette étape, les résultats sont revus de manière critique par l'ensemble des acteurs du projet afin de déterminer si oui ou non les résultats correspondent aux attentes de chacun. Les résultats sont considérés comme validés uniquement s'ils sont à la fois logiques et satisfaisants pour l'ensemble des acteurs.

Si les résultats ne sont pas satisfaisants, alors il convient de vérifier que les données entrées dans l'outil (p. ex. : pour SCHEMA-SI, il s'agit de la trame) sont conformes à ce qui avait été défini par le groupe de travail (c'est-à-dire vérifier l'absence d'erreurs de codage). Si cette première étape ne résout pas le problème, il est alors nécessaire de remettre en question certains choix faits plus en amont dans la démarche. Par exemple, les erreurs peuvent provenir :

- d'une mauvaise adaptation entre l'outil de simulation et les phénomènes à évaluer (cf. étape E) ;
- d'incohérences dans les scénarios (cf. étape D). Avec SCHEMA-SI, les incohérences peuvent venir de l'outil (bug numérique) ou d'une erreur de construction dans la trame (p. ex. : délais mal fixés) ;
- d'une mauvaise définition des critères de performance (cf. étape B).

Si ces erreurs ne peuvent être raisonnablement corrigées ou si aucune explication satisfaisante quant à la divergence des résultats ne peut être obtenue, **le projet devrait être abandonné**. De plus, il est souhaitable qu'une conclusion vienne étayer les raisons de cet abandon, afin d'éviter qu'elles ne se reproduisent. Enfin, il est nécessaire de se poser des questions sur l'archivage d'un travail effectué, qu'il soit réussi ou non.

I.B.g) Choix justifié des mesures correctives à mettre en place et évaluation de l'acceptabilité de la solution

Ce paragraphe se rapporte à la phase G de la Figure 33 ainsi qu'à la phase de questionnement entre la phase G et la phase H.

Afin de choisir un ensemble de mesures correctives à mettre en place (= une stratégie), il est nécessaire d'évaluer le risque encouru pour chaque stratégie, puis de définir des critères de sélection pour identifier la stratégie la plus appropriée. Une réflexion sur la manière d'évaluer le risque incendie et de sélectionner les stratégies à mettre en œuvre devrait idéalement être menée. À titre illustratif, deux ébauches de réflexion sont présentées ci-après. D'autres sont présentées dans le cinquième chapitre.

Utilisation de la fréquence d'occurrence des E.N.S. par stratégie

Remarque :

Cette approche est celle retenue lors de l'étude de faisabilité de l'outil SCHEMA-SI (Demouge, et al., 2007).

Pour l'ensemble des scénarios d'une stratégie i , la fréquence d'occurrence d'un E.N.S. j , notée $F_{i,j}$, se calcule comme le rapport du nombre de scénarios voyant apparaître l'E.N.S sur le nombre total de scénarios.

$$F_{i,j} = \frac{\text{nombre de scénarios de la stratégie } i \text{ voyant apparaître l'E.N.S. } j}{\text{nombre total de scénarios simulés pour la stratégie } i}$$

Pour chaque stratégie, il est alors possible de définir autant de fréquences d'occurrence que d'E.N.S., et ces fréquences peuvent être présentées sous forme de tableau, comme l'illustre la Figure 34.

	E.N.S. 1	E.N.S. 2	E.N.S. 3
Stratégie 1	$F_{1,1}$	$F_{1,2}$	$F_{1,3}$
Stratégie 2	$F_{2,1}$	$F_{2,2}$	$F_{2,3}$
Stratégie 3	$F_{3,1}$	$F_{3,2}$	$F_{3,3}$

FIGURE 34 : EXEMPLE DE PRÉSENTATION PERMETTANT DE COMPARER LES FRÉQUENCES D'OCCURRENCE D'E.N.S. PAR STRATÉGIE

En toute logique, la stratégie la mieux adaptée est celle qui présente les fréquences d'occurrence les plus faibles. Toutefois, le choix n'est pas toujours aisé puisqu'une seule et même stratégie ne présente pas nécessairement les fréquences d'occurrence les plus faibles pour l'ensemble des E.N.S. Par exemple, la stratégie 1 peut être la plus sécuritaire vis-à-vis de l'E.N.S. 1 mais également la moins sécuritaire vis-à-vis de l'E.N.S. 3. Dans cette configuration, il peut être utile d'ajouter aux E.N.S. une **gravité** pondérée, avec une pondération d'autant plus importante que la cible touchée est capitale (p. ex. : appliquer une pondération plus forte sur l'E.N.S. « décès de monsieur X » que sur l'E.N.S. « blessure de monsieur X »). D'une manière plus générale, l'ouverture de la démarche aux outils d'aide à la décision est plus que souhaitable (Bouyssou, 2006). Par ailleurs, certaines études d'ISI sont déjà ouvertes à ces approches (Chorier, 2007), (DFHCM, 2005).

En parallèle, la notion d'acceptabilité peut être ajoutée à la démarche en utilisant la stratégie correspondant aux prescriptions réglementaires (ou à l'état avant travaux) comme base d'acceptabilité. Le choix de cette base d'acceptabilité se justifie au regard du règlement de sécurité, lequel stipule explicitement que « les travaux ne peuvent avoir pour conséquence de diminuer le niveau de sécurité du bâtiment » (Cocco, et al., 2004). Un code couleur peut alors être utilisé pour comparer les stratégies au premier coup d'œil. La Figure 35 illustre un exemple de code couleur utilisable, inspiré de (Demouge, et al., 2007). Dans cet exemple, la stratégie de référence est la stratégie 2. Toujours dans cet exemple, la stratégie 1 (comparée à la stratégie 2) :

- est plus sécuritaire vis-à-vis de l'E.N.S. 1 c'est-à-dire que $F_{1,1} < F_{2,1} - x \%$ (code vert) ;
- est également sécuritaire vis-à-vis de l'E.N.S. 2 c'est-à-dire que $F_{1,2} = F_{2,2} \pm x \%$ (code jaune) ;
- est moins sécuritaire vis-à-vis de l'E.N.S. 3 c'est-à-dire que $F_{1,3} > F_{2,3} + x \%$ (code orange).

Avec x défini comme le seuil de significativité, correspondant à l'écart de fréquence à partir duquel la différence entre les stratégies est significative. Dans (Demouge, et al., 2007), x vaut 15% mais cette valeur n'a pas été justifiée par une étude statistique.

	E.N.S. 1	E.N.S. 2	E.N.S. 3
Stratégie 1	$F_{1,1}$	$F_{1,2}$	$F_{1,3}$
Stratégie 2	$F_{2,1}$	$F_{2,2}$	$F_{2,3}$
Stratégie 3	$F_{3,1}$	$F_{3,2}$	$F_{3,3}$

FIGURE 35 : EXEMPLE DE CODE COULEUR DE COMPARER LES FRÉQUENCES D'OCCURRENCE D'E.N.S. PAR STRATÉGIE

En conclusion, ce type d'approche par fréquences d'occurrence d'E.N.S. et par stratégie présente l'intérêt d'une lecture rapide des résultats. Cependant, des difficultés liées au choix de la stratégie la plus sécuritaire subsistent si une configuration améliore certains aspects tout en dégradant d'autres. En outre, les notions de coûts de mise en œuvre ne sont pas du tout abordées ici, ni aucun E.N.S. liés aux objectifs stratégiques d'ailleurs. Dans tous les cas, les outils d'aide à la décision semblent adaptés pour répondre à ce problème. Enfin, ce type d'approche présente d'autres limites. En effet, nous pouvons constater que :

- l'instant d'occurrence des E.N.S. n'est pas connu ;
- les détails des scénarios ne sont pas donnés puisque tous les scénarios d'une stratégie sont confondus ;
- il reste difficile de définir des seuils de significativité permettant de comparer les stratégies .

Utilisation d'une grille fréquence – gravité

En analyse des risques, des grilles fréquence-gravité semblables à celle de la Figure 36 (Chorier, 2007) sont communément utilisées. Dans ces grilles, une limite d'acceptabilité sert de frontière entre la zone de risque acceptable et la zone de risque inacceptable.

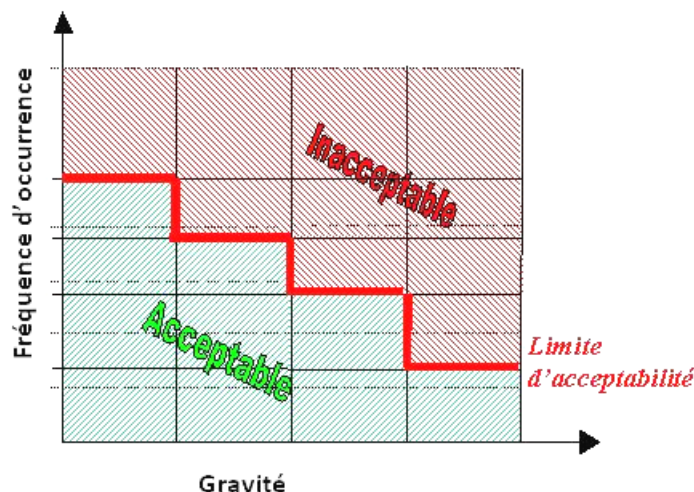


FIGURE 36 : GRILLE « FRÉQUENCE X GRAVITÉ »

D'une manière générale, la construction de ces grilles requiert de faire face à deux niveaux de réflexion. Le premier concerne la définition des axes de la grille qui peuvent être quantitatifs ou qualitatifs. Le second consiste à situer dans la grille la frontière entre le risque acceptable et le risque inacceptable.

D'une manière spécifique à SCHEMA-SI, il est possible, pour chacune des stratégies, de mettre en abscisse le nombre d'E.N.S. par scénario (gravité) et en ordonnée le nombre de scénarios (fréquence). La Figure 37 illustre cette idée. Ainsi, une stratégie voyant apparaître beaucoup de scénarios dans lesquels de multiples E.N.S. sont réalisés est dangereuse (p.ex. : stratégie 3 sur l'exemple de la Figure 37). A l'inverse, une stratégie pour laquelle le peu de scénarios conduisant aux E.N.S. n'en voient apparaître qu'un ou deux (d'E.N.S.) est sécuritaire (p.ex. : stratégie 1 sur l'exemple de la Figure 37).

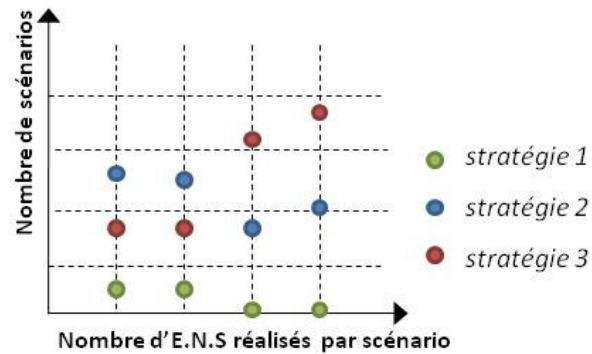


FIGURE 37 : EXEMPLE DE PRÉSENTATION PERMETTANT DE COMPARER LES FRÉQUENCES D'OCCURRENCE D'E.N.S. PAR STRATÉGIE

Concernant la frontière entre le risque acceptable et le risque inacceptable, les points de la grille obtenus pour les stratégies « réglementaire » ou « état avant travaux » peuvent être utilisés pour définir le seuil d'acceptabilité. Ainsi, les points situés au-dessus de cette ligne discriminent la stratégie qu'ils représentent (p. ex. : la stratégie 3 de la Figure 38), puisqu'ils figurent dans le domaine de l'inacceptable. Sur l'exemple de la Figure 38, la stratégie de référence est la stratégie 2. Toujours sur cet exemple et par comparaison à cette référence d'acceptabilité, la stratégie 3 est disqualifiée. En effet, deux points la représentant se situent dans le domaine de l'inacceptable.

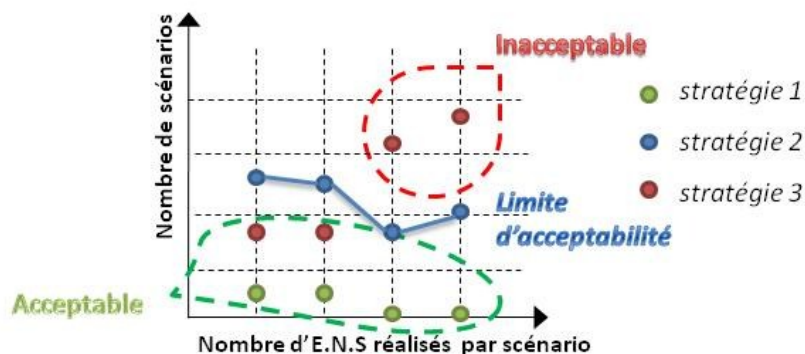


FIGURE 38 : EXEMPLE DE PRÉSENTATION PERMETTANT DE COMPARER LES FRÉQUENCES D'OCCURRENCE D'E.N.S. PAR STRATÉGIE – AJOUT D'UNE LIMITE D'ACCEPTABILITÉ

Remarque :

Une réflexion sur la manière d'introduire dans ces grilles un système de pondération de gravité en fonction des E.N.S. réalisés pourrait être menée.

En conclusion, ce type d'approche par grille fréquence x gravité présente l'intérêt d'une lecture rapide des résultats. En outre, la mesure du risque est plus fine que dans l'approche précédente puisque les scénarios ayant vu apparaître des E.N.S. sont répartis en catégorie, selon le nombre d'E.N.S. apparus. Toutefois, pour cette approche également, des difficultés liées aux choix des

stratégies subsistent, notamment lorsque qu'aucune stratégie n'apparaît clairement comme étant la meilleure. Ici encore, les outils d'aide à la décision pourraient apporter un plus. Globalement, les mêmes limites que celles identifiées précédemment subsistent (absence de datation des E.N.S., difficulté de définir des seuils de significativité, absence de pondération...). Pour prendre en compte le temps, des histogrammes représentant les différents instants d'occurrence d'un E.N.S. selon les scénarios peuvent être construits pour chaque stratégie. Cette proposition d'amélioration est approfondie dans le cinquième chapitre.

Synthèse et memento

Quelle que soit la manière de les présenter, les résultats expriment une mesure du risque incendie. Cette mesure permet au groupe de travail de définir la meilleure stratégie à mettre en place. Toutefois, il est essentiel d'envisager les cas où aucun compromis ne puisse être trouvé entre les différents acteurs. Lorsqu'une telle configuration se présente, alors l'étude doit être revue (modification des objectifs à atteindre, des mesures correctives à évaluer) ou abandonnée (cf. étapes J de la Figure 33).

Pour mémoire, pour une stratégie étudiée, le risque est d'autant plus important que :

- le nombre de scénarios ayant conduit à un E.N.S. est grand (fréquence) ;
- le nombre d'E.N.S. survenus par scénario est grand (gravité) ;
- des E.N.S. jugés graves selon un code de pondération restant à définir se sont réalisés (gravité) ;
- les critères de réalisation d'E.N.S. utilisés sont stricts ;
- l'écart avec la stratégie de référence (p. ex. : état avant travaux ou configuration réglementaire) est important et défavorable pour la stratégie étudiée (acceptabilité).

I.B.h) Conclusion, devenir de l'étude

Ce paragraphe se rapporte à la phase H de la Figure 33.

À la fin de toute étude, des questions d'ordre général devraient être posées et un retour d'expérience effectué. Tout d'abord, il est souhaitable de se demander si les objectifs initiaux ont été atteints, et ce dans quelle mesure. Ensuite, un questionnement quant aux éventuelles tâches à reprendre devrait être envisagé. En outre, les aspects relatifs à la communication du travail à des collègues ou vers d'autres sphères nécessitent une réflexion (qu'en dire, quel support de communication utiliser, à qui s'adresse le message ?). Enfin, la question d'un archivage raisonné des études est, à mon avis, très importante.

I.C Synthèse

Cette première partie a posé un cadre général de ce qui est fait et, surtout, sur ce qui devrait être fait pour que la réalisation d'une étude utilisant l'outil de simulation SCHEMA-SI soit parfaitement opérationnelle. Étant donné l'étendue et la diversité du travail à réaliser, tout n'a pas pu être traité dans le cadre de cette recherche doctorale. Ainsi, des tâches plus ciblées ont été sélectionnées dans cette méthode idéale pour constituer un itinéraire de recherche faisable. Cette sélection fait l'objet du paragraphe suivant.

II. CONSTRUCTION D'UN ITINÉRAIRE DE RECHERCHE ET CHOIX D'UN POSITIONNEMENT MÉTHODOLOGIQUE

II.A Définition d'un objectif de recherche

Parmi les axes de recherches pouvant être dégagés de la méthode idéale présentée ci-avant, certains ont déjà été engagés par le CSTB à travers des études. Ces axes ne nécessitaient donc pas d'être abordés plus en détail dans la présente recherche doctorale. Parmi ces études, il est notamment possible d'en citer deux. La première (Fromy, et al., 2008) vise à confronter le modèle CIFI 2009 à CFAST. La seconde (Mangin, et al., 2009) est une étude de sensibilité des résultats de l'étude SCHEMA-SI de (Demouge, et al., 2007).

Toutefois, de nombreux champs restaient à investir. Parmi ces champs, le choix d'un objectif de recherche a été guidé par :

- le besoin d'une identification, lors de la réalisation d'applications pratiques⁴⁵ dans le cadre contractuel du PN-ISI, des difficultés principales subsistant dans l'utilisation de SCHEMA-SI ;
- la volonté de chercher un projet d'envergure suffisante pour faire l'objet d'une recherche doctorale, et non un sujet « patchwork » composé d'une multitude d'actions de recherche dissociées.

L'objectif retenu est celui de mener une réflexion quant à la construction d'une bonne trame pour SCHEMA-SI. Une trame est dite « bonne » si elle est à la fois parfaitement compatible avec SCHEMA-SI (c'est-à-dire exprimée sous forme de réseaux de Petri) et acceptée par les membres du groupe de travail. En outre, sachant qu'une trame doit être construite à chaque étude d'ISI, il est important que cette construction soit répétable. Pour cela, il convient de définir clairement la manière de construire la trame, c'est-à-dire de définir une méthode pour faire ce travail. Cette méthode, baptisée **ISI-Systema**, est une **méthode de modélisation** et la **trame** est considérée comme étant **un modèle de l'établissement en feu**.

La méthode ISI-Systema, dont la construction est l'objectif principal de cette thèse n'est rien de plus qu'un sous-ensemble de la méthode idéale présentée ci-avant. En effet, la méthode de modélisation ISI-Systema permet de mener à bien les étapes D et E de la Figure 33.

II.B Choix d'un positionnement méthodologique

Rappel sémantique :

La méthodologie est l'étude des pratiques ou méthodes utilisées pour résoudre un problème défini.

Une méthode est une manière de conduire et d'exprimer sa pensée conformément à des principes édictés.

Le positionnement méthodologique est l'ensemble de ces principes ; il s'agit de la base sur laquelle s'appuyer pour concevoir une méthode.

⁴⁵ Des applications pratiques ont été réalisées durant la thèse. L'une d'entre elle a donné naissance à une publication et à une communication orale dans un congrès international (Muller, et al., 2010).

Comme précisé plus haut dans le texte, le problème à résoudre dans le cadre de cette recherche doctorale est **l'élaboration d'une méthode pour construire une trame compatible avec SCHEMA-SI**. Le positionnement méthodologique retenu pour construire cette méthode s'appuie sur deux principes fondamentaux. La modélisation des systèmes d'une part et la traduction d'un modèle exprimé dans un langage de modélisation A en un modèle exprimé dans un langage de modélisation B d'autre part. En d'autres termes, la construction de la méthode s'appuie sur les concepts de la **systémique** et de **l'ingénierie dirigée par les modèles (IDM)**.

L'ouverture à une **approche systémique** a été guidée par :

- la complexité du problème traité (le paragraphe I.D du premier chapitre illustre la complexité du déroulement d'un incendie) ;
- l'usage réussi de la systémique dans la construction de méthode d'analyse de risques (le paragraphe IV.C du premier chapitre illustre la fécondité des concepts systémiques dans l'analyse de risques) ;
- un désir personnel d'investir le champ disciplinaire de la systémique.

L'ouverture à une approche **IDM** a été guidée par :

- le fait que la modélisation systémique propose des langages de modélisation différents des réseaux de Petri (p. ex. : boîtes noires, réservoirs, vannes, etc.) ;
- le besoin de pouvoir communiquer lors de la construction de la trame et le constat que les réseaux de Petri demeurent un langage de spécialistes, autour desquels l'établissement d'une discussion s'avère délicate ;
- l'inévitabilité de l'usage des réseaux de Petri pour implémenter la trame dans SCHEMA-SI.

II.C Construction d'un itinéraire de recherche

L'idée sur laquelle la présente recherche repose est celle **d'utiliser un langage issu de la systémique pour construire la trame, puis d'utiliser les concepts de l'IDM pour construire une démarche de traduction de cette trame en réseaux de Petri**. Cette idée peut être synthétisée dans la Figure 39, qui retrace la logique de la méthode ISI-Systema.

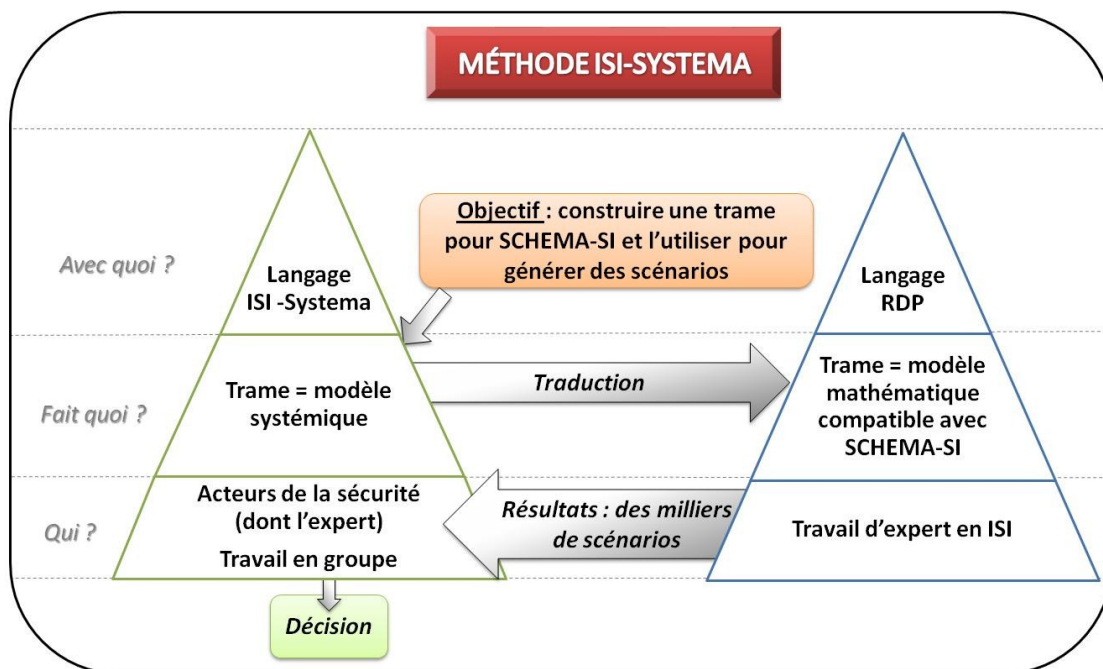


FIGURE 39 : LA MÉTHODE ISI-SYSTEMA

L'objectif général de la méthode est la construction d'une trame compatible avec SCHEMA-SI. À partir de cet objectif, la méthode est découpée en **deux parties**, représentées par les deux triangles de la Figure 39. Ces triangles se lisent du bas vers le haut, pour définir qui (base du triangle) fait quoi (milieu du triangle) avec quel outil ou plutôt quel langage (haut du triangle).

Le triangle de gauche, en vert dans la Figure 39, sert à définir, à vérifier et à valider la trame (cf. phase D de la méthode idéale représentée en Figure 33). Ce travail est réalisé par un groupe de travail, constitué d'acteurs de la sécurité. Bien entendu, il s'agit du même groupe de travail que celui constitué à la phase A de la méthode idéale (cf. Figure 33). Afin de mener à bien le travail, un langage dit langage ISI-Systema est utilisé. L'idée de base de ce langage vient de la constatation, en tout début de thèse, que les méthodes d'analyse systémiques présentées au chapitre précédent proposent des formalismes graphiques de représentation des systèmes complexes relativement simples à comprendre. Si un formalisme représente (assez) fidèlement un système complexe et qu'il est (relativement) simple à comprendre, alors la complexité est (plus) facile à appréhender. Le langage ISI-Systema est d'ailleurs le fruit d'une hybridation entre les formalismes de représentations de (De Rosnay, 1975), de (Le Moigne, 2006) et de (Lesbats, et al., 1993). Le langage ISI-Systema est un langage graphique permettant au groupe de travail de construire le scénario et il offre l'avantage d'être simple et communicable, tout en permettant la pose d'hypothèses nécessaires à la mise en équations du problème.

Le triangle de droite, en bleu dans la Figure 39, est dédié à la simulation des scénarios et à la recherche de situations de danger dans ces scénarios (cf. étape E Figure 33). Pour que ce travail soit possible, il est nécessaire que la trame précédemment définie ait été traduite du langage ISI-Systema en réseaux de Petri compatibles avec SCHEMA-SI. En raison de la spécificité des connaissances requises pour mener à bien cette mission, ce travail est réalisé uniquement par l'expert en sécurité incendie. Celui-ci présente ensuite les résultats au groupe travail, sous la forme qu'il estime être la plus adéquate, et la méthode idéale continue à la phase F de la Figure 33. C'est par ailleurs à cette frontière que la présente recherche doctorale prend fin.

Pour parvenir à construire une telle méthode, il est nécessaire de :

- construire le langage ISI-Systema – ce travail fait l'objet du troisième chapitre ;
- construire les règles de traduction permettant le passage d'un langage à l'autre – ce travail fait l'objet du quatrième chapitre ;
- d'évaluer la méthode sur une application pratique – ce travail fait l'objet du cinquième chapitre.

**SYNTHÈSE DU
CHAPITRE :**

Dans un premier temps, ce chapitre a mis en évidence une **méthode** dont l'objectif est **d'encadrer le déroulement d'une étude de sécurité incendie avec l'outil SCHEMA-SI**. Par ailleurs, ce chapitre a ouvert des **perspectives** d'utilisation (ou de création) **d'outils adaptés** pour mener à bien les tâches à accomplir dans cette démarche. Cette méthode a été baptisée **méthode idéale** parce qu'elle correspond au but à atteindre à long terme.

Dans un second temps, ce chapitre a mis en évidence que **l'un des objectifs** à accomplir pour parvenir à cette méthode est le **développement d'une sous-méthode de construction de trames** pour SCHEMA-SI. Cette sous-méthode a été baptisée **ISI-Systema**, et correspond à un but à atteindre à moyen terme. En s'appuyant sur un **double positionnement** méthodologique de **systemique** et **d'ingénierie dirigée par les modèles (IDM)**, ce chapitre a mis en avant une **idée fondatrice** pour construire cette sous-méthode. Cette idée est celle **d'utiliser un langage issu de la systemique pour construire la trame**, puis **utiliser les concepts de l'IDM pour construire une démarche de traduction** de cette trame en réseaux de Petri. En application de cette idée, la **première étape** à la constitution de cette sous-méthode est la **construction du langage adapté**. Ce travail fait l'objet du chapitre suivant.

Troisième chapitre : DÉVELOPPEMENT DU LANGAGE DE MODÉLISATION ISI-SYSTEMA

OBJECTIFS DU CHAPITRE :

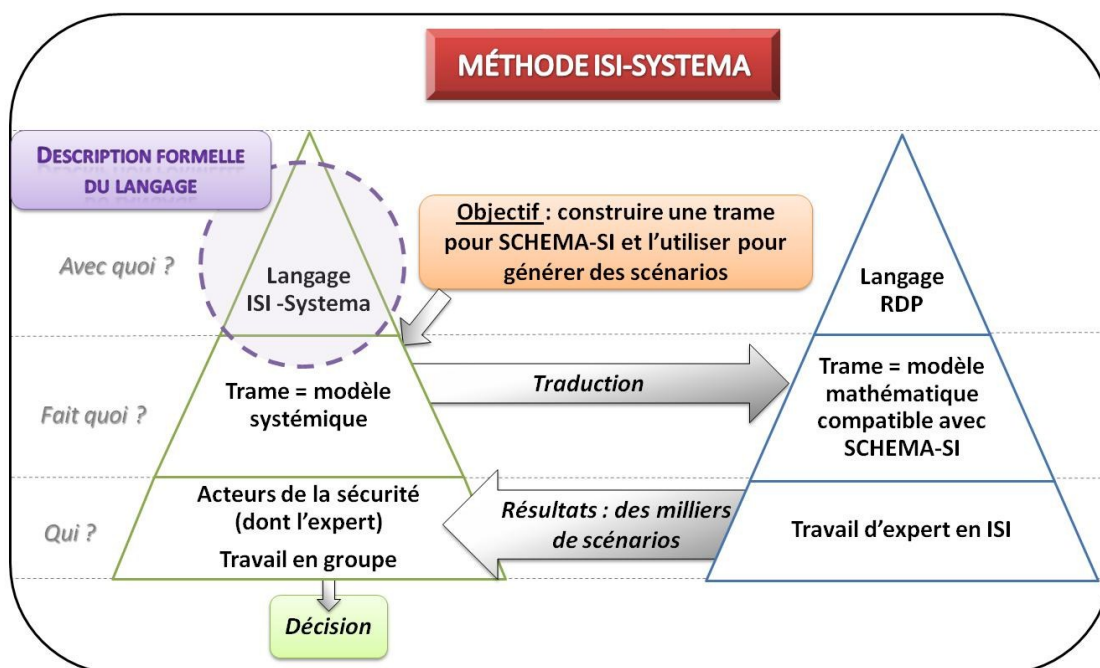
L'objectif de ce chapitre est de développer un langage de modélisation adapté pour représenter une trame sous la forme d'un modèle systémique. À partir de ce modèle systémique, on espère pouvoir construire des réseaux de Petri compatibles avec SCHEMA-SI.

MÉTHODOLOGIE :

Pour atteindre cet objectif, nous avons :

- *cherché dans la bibliographie des modèles ou des langages de modélisation semblant adaptés à nos besoins*
- *extrait les concepts les plus féconds de la bibliographie pour élaborer un nouveau langage de modélisation mieux adapté à notre problématique et à nos contraintes : le langage ISI-Systema*
- *vérifié que ce langage permette de décrire les différents comportements mis en jeu lors d'un incendie en proposant des exemples*
- *proposé une démarche pour construire et vérifier une trame*

POSITIONNEMENT DU CHAPITRE VIS-À-VIS DE LA MÉTHODE



I. RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE ORIENTÉE

La littérature systémique propose des méthodes de modélisation systémique, dont certaines sont détaillées au paragraphe IV.C du premier chapitre. Derrière ces modèles se cachent des langages de modélisation, c'est-à-dire des formalismes utilisés pour représenter les modèles. De même, la littérature informatique propose des langages de modélisation pour construire des modèles de système comme SysML (Friedenthal, et al., 2009) ou de logiciel comme UML (Muller, et al., 2005).

La bibliographie a été parcourue avec des critères de sélection, critères qui sont détaillés en partie I.A. Les langages sélectionnés grâce à ces critères ont été utilisés pour représenter l'activité d'un système « établissement en feu » et une étude comparative a été menée dans l'espoir d'identifier le langage le mieux adapté. Les résultats de cette étude comparative sont disponibles en partie I.B.

I.A Définition de critères de sélection dans la bibliographie

Pour être idéal par rapport à nos besoins, le langage de modélisation devrait respecter les contraintes suivantes :

- modéliser, avec le même langage (aspects multicritères) :
 - ✓ la physique du feu (propagation du feu et de la fumée dans les locaux) ;
 - ✓ le comportement humain lors d'un sinistre ;
 - ✓ les réponses du bâtiment et de ses composants à l'agression du feu et de la fumée
- être suffisamment simple et intuitif pour être utilisé par un groupe de travail (aspect multi-acteurs) ;
- pouvoir être traduisible en réseaux de Petri compatibles avec SCHEMA-SI.

Forts de ces contraintes, nous avons défini les quatre critères de sélection suivants :

- A. la portabilité vers les réseaux de Petri est démontrée dans la biblio
- B. le langage permet une analyse multivue et/ou multicritère d'un même système
- C. le langage permet de séparer les phénomènes continus/phénomènes discrets tout en prenant en compte des interactions mutuelles
- D. le langage est suffisamment simple pour être utilisé par un groupe de travail

En retenant tout langage respectant au moins un critère, la liste de langages suivante a été construite :

- la représentation réservoir/vanne utilisée dans le Macroscopie (De Rosnay, 1975) : respect des critères B et D ;
- les langages de modélisation UML (Muller, et al., 2005) et SysML (Friedenthal, et al., 2009) : respect des critères B et A⁴⁶ ;
- la représentation des boîtes noires utilisée dans la Systémographie (Le Moigne, 2006) : respect du critère D ;
- la représentation des événements utilisée dans le modèle MADS (Lesbats, et al., 1993) : respect des critères A⁴⁷ et D.

⁴⁶ La construction de réseaux de Petri à partir d'un diagramme de séquence UML a été démontrée par (Villani, et al., 2007)

⁴⁷ La construction de réseaux de Petri à partir du modèle MADS a été démontrée par (Thibaut, et al., 2009)

Ces langages ont été testés dans le cadre d'une étude comparative.

I.B Étude comparative des langages retenus

Pour faire cette étude, des modèles ont été construits avec chacun des langages. Les avantages et inconvénients de chacun ont ainsi pu être identifiés. Le résultat de ce travail est résumé dans le tableau suivant.

Langage	Avantages	Limites relatives (pour les besoins de la méthode)
MADS	- permet de définir des événements ; - permet de générer des scénarios d'accident en définissant des enchaînements d'événements ; - portabilité vers réseaux de Petri démontrée (Thibaut, et al., 2009).	- le modèle est spécifique pour les dangers ; - les réseaux de Petri construits par (Thibaut, et al., 2009) sont différents de ceux utilisés dans SCHEMA-SI ; - pas de processus continus : difficulté d'intégrer le modèle physique ; - approche plus qualitative que quantitative : le risque est déterminé instinctivement et n'est pas calculé.
Boîtes noires	- permet de s'affranchir de ce qui se passe dans la boîte noire et donc d'analyser un système sans connaître finement ses parties ; - souple et puissant en terme de possibilités de modélisation.	- rapidement illisible ; - portabilité vers les réseaux de Petri restant à imaginer.
UML et SysML	- multi-vue ; - très formalisé et répandu ; - portabilité vers réseaux de Petri démontrée (Villani, et al., 2007).	- nécessite un temps d'adaptation long pour comprendre ce qui est représenté ; - trop orienté logiciel (pour UML) ; - pas de processus continus : difficulté d'intégrer le modèle physique.
Macroscopie	- simple, imagé ; - semble adapté pour modéliser un système hybride (réservoirs et flux représentant les aspects continus et boucle de rétroaction les événements discrets).	- de nombreuses boucles de rétroaction rendent le modèle illisible ; - formalisation limitée.

TABEAU 5 : ÉTUDE COMPARATIVE DES LANGAGES ISSUS DE LA LITTÉRATURE

À l'issu de ce travail, il est apparu qu'aucun langage de la bibliographie n'a permis de répondre parfaitement à nos besoins. Cette constatation nous a mené à développer un langage spécifique ; langage qui a été baptisé langage ISI-Systema, ISI pour Ingénierie de la Sécurité Incendie et *Systema* signifiant en latin système.

II. DESCRIPTION DU LANGAGE ISI-SYSTEMA

Le présent paragraphe a pour but de poser les définitions et les bases du langage de modélisation ISI-Systema. À côté de chaque définition, l'auteur dont le concept est inspiré est cité.

II.A Origines du langage ISI-Systema

Pour parvenir à construire un langage, nous avons isolé, les concepts les plus féconds par rapport à nos besoins. Ces concepts, issus de la littérature, ont été plus ou moins transformés et réutilisés. Ils sont les suivants :

- les notions de **réservoirs et de flux** (De Rosnay, 1975) ont été repris (et ajustés) parce qu'ils sont adaptés pour **faire des bilans de conservation** (de masse et d'énergie) ;
- le modèle **MADS** (Lesbats, et al., 1993) a été repris et adapté, parce qu'il permet à la fois une **identification indépendante des événements** et la **gestion de leur séquençage dans le temps** ;
- la notion de **processus** (Le Moigne, 2006) a été retenue parce qu'elle permet de découper l'activité d'un système en **fonctions indépendantes**, tout en conservant les **interactions** entre les processus-fonctions ;
- la notion de **neutralité d'interaction** (Le Moigne, 2006) a été retenue car elle permet de faire la distinction entre une **possibilité d'interaction** et une **interaction effective** (p. ex. : « l'alarme peut être entendue par un individu » est différente de « l'alarme est entendue par un individu »).

Ensuite, nous avons utilisé ces concepts pour construire progressivement un langage adapté. Pour vérifier l'adaptation, nous avons procédé par itérations entre la définition théorique du langage et les applications. Nous avons cessé les itérations lorsque le langage nous semblait adapté. Dans un premier temps, nous avons cherché un langage qui puisse représenter le modèle physique de CIFI 2009. Ensuite, nous avons cherché à greffer les événements permettant d'assurer l'hybridation entre ce modèle physique et les événements discrets. Enfin, nous avons cherché à vérifier si le langage permettait de représenter l'intégralité des événements à considérer dans une trame.

In fine, la logique du langage s'appuie sur les trois points fondamentaux suivants :

- le découpage de l'activité en processus élémentaires, et un processus élémentaire correspond à un type de transformation d'éléments (inspiré de (Le Moigne, 2006)) (cf. II.C) ;
- l'association de symboles aux processus élémentaires (inspiré de (De Rosnay, 1975)) (cf. II.D) ;
- la représentation d'une entité par autant de symboles que de processus dans lesquels cette entité est impliquée (soit en tant qu'acteur, soit en tant que cible).

II.B Définitions préalables

Un **système complexe** se définit comme un ensemble d'entités en relation, qu'il est impossible de considérer indépendamment les unes des autres pour l'appréhender. Une **entité** est l'unité structurelle la plus petite considérée à l'échelle de l'analyse (p. ex. : une installation sprinkler, une personne, un foyer...). L'ensemble des entités constitue la **structure du système**.

Une entité a une **activité** : elle fait des choses. L'activité est donc synonyme de fonctionnement. Cette activité se déroule en interactions avec l'activité des autres entités du système et avec

l'environnement. **L'activité du système** résulte à la fois de l'activité des entités qui le composent, et des interactions qu'elles entretiennent (Inspiré de (Le Moigne, 2006)). L'activité du système est donc plus que la somme des activités des entités : c'est la notion d'**émergence** (inspiré de (Morin, 2005)).

L'**environnement** (inspiré de (Le Moigne, 2006)) du système constitue le contexte spatio-temporel dans lequel le système s'inscrit. Le système est ouvert sur son environnement puisque l'environnement peut impacter le système vice-versa. **Exemple** : entrée d'air par l'intermédiaire des fenêtres, évacuation des personnes, amenée d'eau par les lances à incendie...

Le langage a été construit pour représenter l'**activité** du système « établissement en feu ». Pour cerner cette activité, il est nécessaire de quantifier les transformations subies dans le système par des **éléments** (inspiré de (De Rosnay, 1975)). Un élément est composé de matière, d'énergie et/ou d'information. Concrètement, il s'agit de ce qu'il est nécessaire de tracer au cours du temps pour comprendre l'activité. Les éléments de même nature peuvent être regroupés par type. **Exemple** : une personne, de la chaleur, une molécule de comburant, un message d'alerte...

Remarque importante :

Élément n'est pas synonyme d'entité, même si, selon le cas, une entité peut également être un élément ! Concrètement, l'élément est **l'objet changé** (il subit des transformations) tandis que l'entité est une **unité structurelle** dont les fonctions potentielles sont plus vastes. Par exemple, une entité peut :

- être l'objet changeur (elle fait subir des transformations à des éléments) ;
- être le siège de changements (des transformations d'éléments y ont lieu sans qu'elle en soit à l'origine) ;
- être l'objet changé (**elle est alors également un élément**).

II.C Découpage de l'activité en cinq processus élémentaires

Pour cerner l'activité du système, cinq processus élémentaires ont été retenus. À chacun de ces processus ont été associés un nom et un type de transformation d'éléments. Le tableau suivant récapitule les cinq processus ainsi que leurs effets sur les éléments.

Nom du processus élémentaire	Type de transformation - fonction	Exemples de phénomènes représentés
processus de création	créer, générer des éléments	pyrolyse, apparition de produits de réaction, réaction exothermique...
processus de destruction	détruire, effacer des éléments	disparition de réactifs, réaction endothermique...
processus de stockage	accumuler, mémoriser, stocker des éléments	montée en température, en pression, conscience du danger, localisation des personnes...
processus de transfert	transférer, échanger, transporter des éléments	transferts thermiques, débits aux ouvertures, transfert de message - communication, déplacement des personnes...
processus d'action	perturber le transfert des éléments (le ralentir, l'accélérer, le bloquer, empêcher son ralentissement...)	ouverture/fermeture de vantaux, bris de vitrage, ruine de portes, perte de la vie, détection, activation de l'alarme, mise en route du désenfumage, lutte contre le feu, décisions de se déplacer ou de se confiner...

TABLEAU 6 : LES CINQ PROCESSUS ÉLÉMENTAIRES UTILISÉS POUR DÉCOUPER L'ACTIVITÉ D'UN SYSTÈME

À l'origine, les quatre premiers processus ont été retenus afin de pouvoir faire des bilans de conservation et le dernier pour définir des événements. La manière dont les cinq processus sont utilisés pour représenter les différents phénomènes impliqués dans un incendie est détaillée au paragraphe III. Il est important de noter à ce stade que l'analyse de l'activité du système revient à :

- identifier les entités qui réalisent ou subissent des processus, c'est-à-dire identifier les fonctions remplies par chaque entité ;
- identifier sous quelles conditions les processus se réalisent, c'est-à-dire en définir les causes ;
- quantifier les effets des processus sur les éléments, c'est-à-dire en définir les conséquences.

Cette quantification des effets s'exprime soit par un débit d'éléments (quantité créée par unité de temps, quantité détruite par unité de temps, quantité transférée par unité de temps...), soit par une modification du débit suite à un processus d'action (blocage total du transfert, accélération du transfert de x %, etc.). Les débits sont stationnaires (ils varient au cours de temps) et aléatoires (ils dépendent de paramètres aléatoires). Leur expression fait par ailleurs l'œuvre d'une mise en équations.

Une représentation graphique, basée sur des symboles, a été mise au point dans le but de représenter :

- les entités impliquées dans les processus (ceux qui les réalisent et les subissent) ;
- les interactions entre les processus (c.à.d. comment les processus sont interconnectés).

Cette représentation graphique, inspirée à la fois de (De Rosnay, 1975) et de (Lesbats, et al., 1993) fait l'objet du paragraphe suivant.

II.D Représentation graphique basée sur des symboles

Les symboles impliqués sont au nombre de cinq. Ils sont les suivants :

- des boîtes ;
- des connexions ;
- des flèches ;
- des vannes ;
- des modèles de processus d'action.

Ces symboles ainsi que leur signification sont détaillés ci-après.

II.D.a) Boîtes

Une **boîte** représente une entité dans laquelle des éléments peuvent être créés, détruits et/ou stockés. Les boîtes sont donc associées aux processus de création, de destruction et/ou de stockage. L'entité représentée par la boîte peut être l'acteur du processus (elle en est à l'origine) ou simplement le volume dans lequel le processus a lieu (elle en est le siège). Au final, ce qui est important de noter est que l'entité représentée par la boîte remplit la fonction de création, de destruction ou de stockage. À chaque instant, un ou plusieurs débits (si plusieurs processus) sont associés à la boîte.

Une boîte est un symbole « fonctionnalisé », ce qui permet de distinguer les processus de création, de destruction et de stockage. Les symboles retenus sont les suivants :

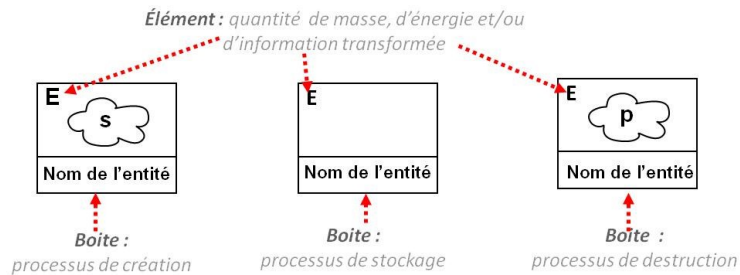


FIGURE 40 : LES SYMBOLES « BOÎTES » FONCTIONNALISÉS

Remarques :

- la lettre s signifie « source » tandis que la lettre p signifie « puits » ;
- dans sa représentation, Joël de Rosnay (De Rosnay, 1975) utilise le terme « réservoir » pour désigner une boîte fonctionnalisée par un processus de stockage. Le terme n'a pas été repris dans le langage ISI-Systema car il semble inadapté pour traduire les notions de création et de destruction.

II.D.b) Connexions

Une **connexion** se conceptualise comme un tuyau, de section donnée, que les éléments peuvent emprunter pour se déplacer dans le système. Une connexion définit donc une possibilité de processus de transfert. Il ne s'agit que d'une possibilité car la connexion n'est pas à l'origine du processus, elle n'en est que le vecteur. Ainsi, par définition, une connexion est neutre (inspiré de (Le Moigne, 2006)) et ne réalise aucune transformation. En outre, par définition, une connexion lie forcément soit deux boîtes ensemble, soit une boîte et l'environnement (qui, au final, est une boîte aux limites floues dans laquelle il est hors de propos de quantifier les processus).

Une connexion se représente par un trait, comme sur la figure suivante.

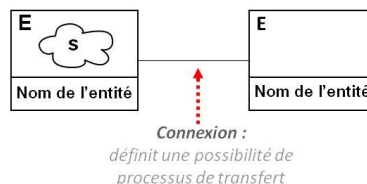


FIGURE 41 : LE SYMBOLE CONNEXION

S'il y a plusieurs types d'éléments (p. ex. : de la masse et de l'énergie), la couleur du trait indique le type d'élément qui peut l'emprunter. Cette distinction est particulièrement utile lorsque l'on souhaite représenter plusieurs aspects sur un même graphe.

II.D.c) Flèches

Une **flèche** sert à représenter le flux dans la connexion. Elle permet d'orienter le sens de l'échange d'éléments entre deux boîtes, ou entre une boîte et l'environnement. La flèche représente donc un processus de transfert. À chaque instant, un débit est associé à la flèche.

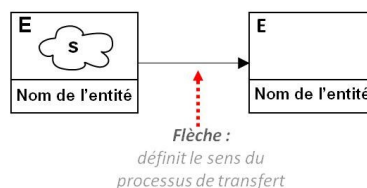


FIGURE 42 : LE SYMBOLE FLÈCHE

La couleur et la forme de tête de la flèche indique le type d'élément (s'il y en a plusieurs) auquel elle se réfère.

II.D.d) Vannes

Par convention, une **vanne** est systématiquement associée à une flèche. Elle représente une possibilité offerte à n'importe quelle entité du système ou à l'environnement de modifier le débit de transfert, par exemple en ouvrant ou en fermant la vanne. La vanne est donc associée au processus d'action. En d'autres termes, une vanne est un artifice conceptuel servant à définir des événements discrets (des processus d'action) dont l'occurrence conditionne le transfert d'éléments d'une boîte à l'autre. Comme pour le cas de la connexion, la vanne n'est pas la cause du processus, mais le vecteur. De cette manière, la vanne ne réalise aucune transformation.

Une vanne se représente de la manière suivante : ∇

II.D.e) Modèles de processus d'action

Le **modèle du processus d'action** est associé au processus d'action. Le modèle du processus d'action est inspiré du modèle MADS (Lesbats, et al., 1993), ce qui permet de définir un processus d'action comme un événement discret. En conséquent, le modèle du processus d'action sert à définir l'ensemble des événements pouvant survenir lors d'un sinistre. Dès lors, il s'agit de l'un des points phares du langage. Par ailleurs, le processus d'action remplace et complète les boucles de rétroactions de la description de (De Rosnay, 1975).

Concrètement, le modèle du processus d'action est un graphique (cf. Figure 43) servant à définir :

- quelles entités du système ou de l'environnement (qui ? quoi ?)...
- peuvent perturber le transfert d'éléments par l'intermédiaire d'une action sur l'une ou l'autre vanne (fait quoi ? comment ? sur quoi ? sur qui ?)...
- et sous quelles conditions initiatrices (pourquoi ?).

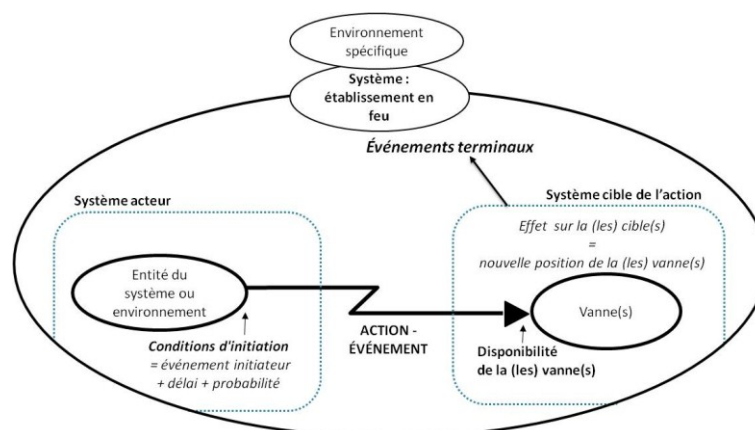


FIGURE 43 : LE MODÈLE DU PROCESSUS D'ACTION

Comme l'illustre la figure ci-avant, le processus d'action se caractérise formellement par deux blocs, symbolisés par les pointillés turquoise. D'une part, il y a le **système acteur** (à gauche sur la figure), regroupant :

- l'entité du système et de l'environnement qui est à l'origine de l'événement (*c'est le « qui ? »*);
- les conditions d'initiation de l'événement (*c'est le « pourquoi ? »*).

D'autre part, il y a le **système cible** (à droite sur la figure), regroupant :

- la ou les vannes impactées (*c'est le « sur qui, sur quoi ? »*);

- les effets de l'événement sur ces vannes (*c'est le « comment ? »*).

Les deux blocs (acteur et cible), sont mis en relation par une action discrète (*c'est le « quoi ? », l'événement*). L'application de cette action sur la cible se solde par la réalisation d'un ou de plusieurs événements, dit **événements terminaux** (*c'est le « quel résultat ? »*).

Exemples :

- l'événement terminal « détecteur activé » nécessite une action de détection ;
- l'événement terminal « porte ouverte » nécessite une action d'ouverture.

En définitive, ce qui est véritablement important dans le processus d'action est d'identifier l'événement terminal (le résultat), le système acteur (qui le fait et sous quelles conditions) ainsi que le système cible (quelles vannes et quelles conséquences sur les autres processus du système). L'action, *in fine*, importe peu et n'a qu'un rôle illustratif (elle donne un nom).

Quelques informations supplémentaires sur les conditions d'initiation

Les conditions d'initiations sont le résultat d'une combinaison de trois facteurs : un événement initiateur, un délai suite à cet événement et une fréquence d'occurrence conditionnelle (sachant que l'événement est vrai et que le délai est écoulé).

Exemple (les valeurs sont arbitraires) :

Une personne évacue :

- une fois sur deux (fréquence d'occurrence) ;
- entre une à deux minutes (délai) ;
- après avoir pris conscience du danger (événement initiateur).

L'introduction des fréquences d'occurrence et des délais permet de modéliser des enchaînements d'événements variables et aléatoires et ainsi de prendre en compte une certaine méconnaissance des comportements.

Quelques informations supplémentaires sur les effets de l'action sur les vannes

L'effet de l'action sur la ou les vannes résulte de combinaisons entre deux facteurs, détaillés ci-après. À partir de ces deux facteurs, $2^2 = 4$ effets différents sont possibles sur les vannes, ce qui permet de représenter, avec le même modèle du processus d'action, des événements de nature très différente (p. ex. : bris de vitrage, verrouillage de porte, décès d'un individu, activation d'un détecteur, décision de confinement...).

Mouvement : ouvrir ou fermer la (les) vanne(s)

Le mouvement sert à modéliser des événements impactant les flux d'éléments dans les connexions (p. ex. : l'ouverture d'une porte augmente les échanges de gaz et d'énergie entre deux locaux). Le mouvement peut se faire avec un certain degré (total ou partiel) et a pour conséquence une modification du débit de transfert (cf. processus de transfert). Le nombre de positions possibles que peut prendre une vanne dans une trame définit son degré de liberté (ddl).

Blocage : bloquer ou ne pas bloquer la (les) vanne(s)

La notion de blocage permet de modéliser l'irréversibilité (totale) d'une position de vanne et la dégradation des fonctions prédéfinies d'une entité. Ainsi, elle permet de modéliser des événements tels que la défaillance, le décès d'une personne, la destruction thermique d'une fenêtre etc.

Remarque :

La notion de déblocage pourrait également être ajoutée pour modéliser des dégradations réversibles des fonctions (p. ex. : le sommeil, l'évanouissement). Les réflexions menées en ce sens n'ont pas suffisamment abouti pour être présentées ici. L'ajout dans le langage a été réussi mais la traduction vers les réseaux de Petri n'a pas été suffisamment réfléchi. Ce point reste donc une perspective d'amélioration

II.E Synthèse

En définitive, le langage ISI-Systema est fortement influencé par les travaux de la systémique, tant en raison de la manière dont le système est découpé que pour la symbolique retenue pour le représenter.

Concernant le découpage, le langage a été construit pour faire coexister deux niveaux de découpage: l'un est structurel et découpe le système en entités tandis que l'autre est fonctionnel et découpe l'activité du système en processus élémentaires. Ces deux niveaux de découpage vont de pair puisque le découpage structurel est utilisé pour analyser l'activité du système entité par entité à l'aide des processus élémentaires. Parmi les cinq processus élémentaires retenus, quatre ont été définis pour écrire des bilans de conservation essentiels pour traduire le modèle de physique de feu, et un pour dénombrer et construire individuellement les événements de la trame. En d'autres termes, le langage a été construit pour identifier point par point (entité par entité puis processus élémentaire par processus élémentaire) les sous-parties de la trame. Ce n'est que lorsque ce travail point par point est achevé que l'activité de l'ensemble du système peut être reconstituée. Cette reconstitution est rendue possible par l'introduction, dans la définition même des processus élémentaires, d'interactions entre processus. Par exemple, le processus de transfert, en ajoutant ou soustrayant des éléments d'une entité, modifie le processus de stockage dans cette entité. De même, le processus d'action, en modifiant la position d'une vanne, modifie le processus de transfert, etc. Ce point relatif aux interactions sera plus approfondi dans les paragraphes à venir.

Concernant la symbolique retenue, elle est principalement influencée par les travaux de (De Rosnay, 1975) et de (Lesbats, et al., 1993). Elle a été construite dans le but de représenter une entité par plusieurs symboles si celle-ci est impliquée dans plusieurs processus élémentaires. Autrement dit, le langage permet de représenter par des symboles les différentes fonctions remplies par les entités. Il en découle que le langage ISI-Systema est un langage orienté fonction. L'objectif du paragraphe suivant revient justement à illustrer ce langage sur des configurations possibles en cas de sinistre.

III. ILLUSTRATION DES POSSIBILITÉS DESCRIPTIVES DU LANGAGE POUR LA SÉCURITÉ INCENDIE

Le langage détaillé dans la partie précédente a été établi par une suite d'essais et d'erreurs. Le langage obtenu au terme de ce processus itératif permet d'une part de représenter tous les aspects nécessaires à la construction d'une trame. Dans la présente partie, nous allons illustrer les possibilités descriptives du langage pour la sécurité incendie, c'est-à-dire de montrer comment il permet de représenter différents aspects d'une trame. La partie suivante s'attachera aux aspects liés à la construction et à la vérification de la trame.

III.A Rappel : qu'est-ce que le langage doit pouvoir représenter pour construire une trame ?

Pour construire une trame de déroulement de sinistre, il convient de modéliser :

- l'extension du feu et le mouvement de la fumée dans le bâtiment ;
- le comportement humain dans le bâtiment et à l'extérieur ;
- un système de sécurité et son fonctionnement ;
- les effets des sources de danger sur les cibles.

Dans les paragraphes suivants, des exemples de modèles, représentés avec le langage ISI-Systema sont proposés. Ces exemples n'ont pas vocation à être généraux, et d'autres modèles sont possibles. De plus, les valeurs considérées sont arbitraires, le but n'étant pas ici de les discuter.

III.B Extension du feu et mouvement de la fumée dans un bâtiment

L'extension du feu et le mouvement de la fumée sont prédits par CIFI 2009, où, comme expliqué au premier chapitre, l'espace de chaque local est découpé en zones. Une zone est soit un volume, soit une surface, où l'on admet l'uniformité de certaines grandeurs physiques caractéristiques du modèle (température, masse volumique, émissivité, etc.). Ces grandeurs sont calculées grâce à des bilans de conservation de la masse gazeuse et de l'énergie interne et à des lois d'échange. Un tel modèle peut être représenté avec le langage ISI-Systema en représentant :

- la masse gazeuse et l'énergie interne par des éléments, notés respectivement $m(g)$ et $e(U)$;
- les zones par des boîtes ;
- les échanges entre zones par des flux.

Dans la suite du document, nous allons rappeler de manière qualitative les hypothèses du modèle de zones (Curtat, 2002) pour deux exemples de représentation avec ISI-Systema.

III.B.a) Le feu et la fumée dans un local fermé

Un exemple de modèle très simple, représenté avec le langage ISI-Systema, est proposé en Figure 44.

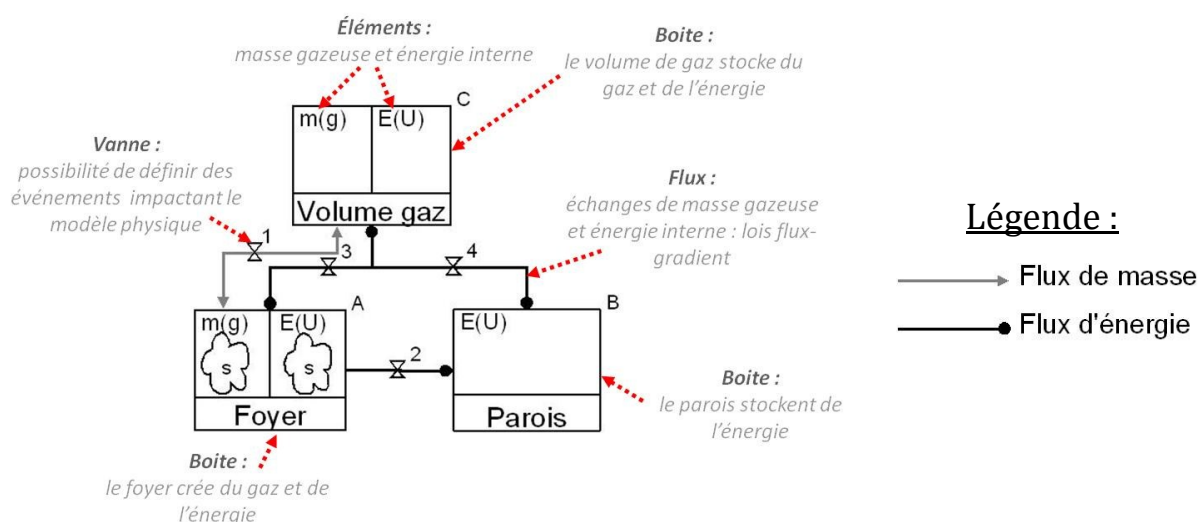


FIGURE 44 : EXEMPLE DE REPRÉSENTATION DU FEU ET DE LA FUMÉE DANS UN LOCAL FERMÉ

Dans cet exemple, le système « local en feu » se compose de trois entités, chacune représentée par une boîte :

- un volume de gaz, représenté par la boîte C (cette boîte regroupe la zone gazeuse haute et la zone gazeuse basse de CIFI 2009) ;
- un foyer, représenté par la boîte A (cette boîte regroupe la zone objet combustible et la zone de flamme de CIFI 2009) ;
- des parois, représentées par la boîte B.

Le volume de gaz stocke du gaz et de l'énergie au cours du temps, c'est pourquoi il est représenté par une boîte, fonctionnalisée avec un double processus de stockage (l'un pour la masse, l'autre pour l'énergie). Ce volume s'emplit de fumée au cours du temps.

Le foyer regroupe un objet solide combustible avec les flammes et le panache le surmontant. Le foyer crée de la masse gazeuse (phénomène de pyrolyse) et de la chaleur (phénomène de combustion) (*cf. boîte « foyer », fonctionnalisée par un double processus de création*). Le foyer alimente le volume de gaz de la chambre en masse et en énergie par élévation du panache flottant et par rayonnement (*cf. flux de masse et d'énergie - vannes V1 et V3*). En contrepartie, de l'air est entraîné du volume de gaz dans le foyer, par effet de frottement (*cf. flux de masse - vanne V1*). S'il y rencontre du combustible et que les conditions sont favorables, il brûle. A ce flux de gaz entraîné est associée une certaine quantité d'énergie convectée (*cf. flux d'énergie - vanne V3*).

Les parois des locaux échangent de la chaleur avec les volumes de gaz (*cf. flux - vanne V4*) mais pas de gaz. Cet échange de chaleur peut se faire dans un sens ou dans l'autre, selon le gradient de température. Pendant la phase de croissance de feu, les parois reçoivent de l'énergie et s'échauffent (*cf. boîte « parois »*). Une partie de cette énergie est restituée durant le déclin du foyer. En parallèle, les parois reçoivent une certaine quantité d'énergie par rayonnement en provenance directe de la flamme (*cf. flux - vanne V2*).

Quelques remarques

Remarque n°1 :

Les vannes 1, 2, 3 et 4 sont autant de possibilités de greffer des événements discrets dont l'occurrence impacte le modèle physique (p. ex. : l'extinction diminue les échanges entre le foyer et les autres boîtes en fermant les vannes V1, V2 et V3). Ce point sera plus largement illustré par des exemples à venir.

Remarque n°2 :

CIFI 2009 est un modèle à deux zones gazeuses : la zone haute, chaude et la zone basse, plus froide. Si la représentation avec le langage ne présente qu'une seule boîte pour les deux (la boîte C), c'est parce que nous avons constaté que cette représentation plus simple étant néanmoins suffisante pour :

- communiquer le modèle à un groupe de travail ;
- identifier les événements importants impactant le modèle physique ;
- construire les réseaux de Petri.

Une représentation plus détaillée, avec autant de boîtes que de zones, est évidemment possible pour entrer plus dans le détail du modèle physique.

Remarque n°3 :

La numérotation des vannes se fait selon des règles précises, non détaillées ici. Cette numérotation permet de se référer aux vannes lors de l'identification des processus d'action.

III.B.b) Le feu et la fumée dans deux locaux communicants ouverts sur l'environnement

Considérons l'exemple de la Figure 45, composé de deux locaux : une chambre (*en rose sur la Figure 45*) et un couloir dit circulation horizontale commune et notée CHC (*en bleu sur la Figure 45*). Ces deux locaux sont mis en communication par une porte. La chambre est munie d'une fenêtre, tandis que le couloir donne sur l'extérieur (*en vert sur la Figure 45*) par une porte. Dans cet exemple, un foyer unique brûle dans la chambre.

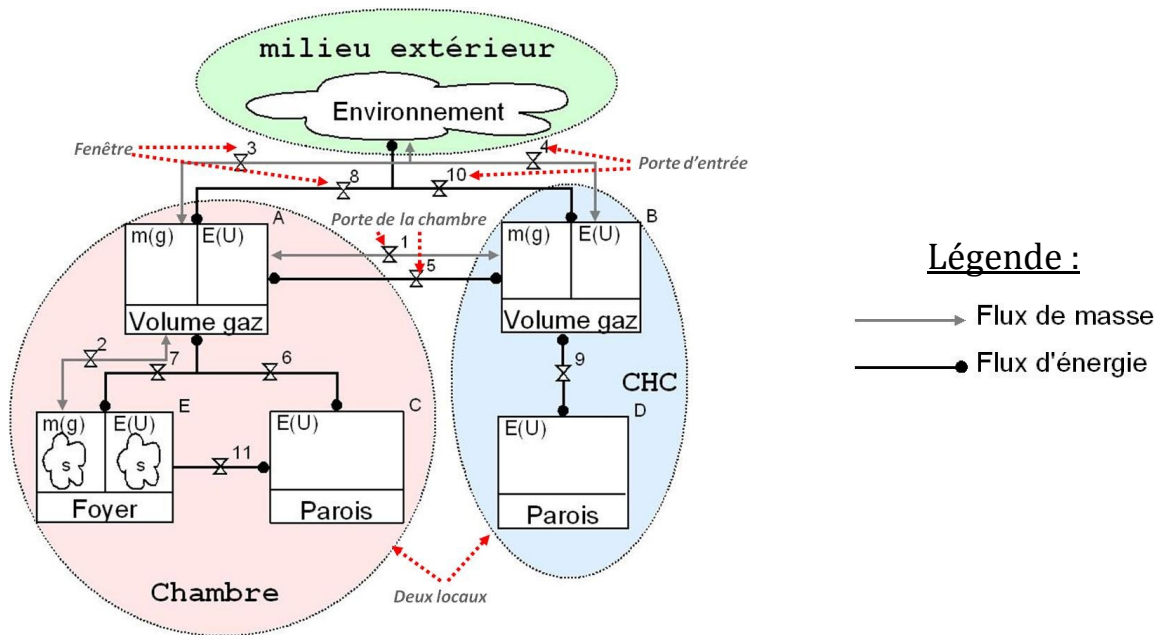


FIGURE 45 : EXEMPLE DE REPRÉSENTATION DU FEU ET DE LA FUMÉE DANS DEUX LOCAUX OUVERTS SUR L'ENVIRONNEMENT

Le contenu de la chambre n'a pas changé par rapport à l'exemple précédent (trois boîtes connectées). Le contenu de la CHC diffère de l'exemple précédent par l'absence de foyer.

Concernant les échanges entre locaux dans cet exemple, du gaz et de l'énergie sont échangés entre les différents volumes de gaz par l'intermédiaire des portes (*cf. vannes V1 et V5 pour la porte de la chambre ; vanne V4 et V10 pour celle de l'entrée*) et de la fenêtre (*cf. vannes V3 et V8*). Ces échanges peuvent se faire soit dans un sens, soit dans l'autre, selon la valeur du champ de pression au niveau des ouvertures. Le ventail de bloc-portes⁴⁸ et des bloc-fenêtres sont représentés par des vannes, dont les mouvements modélisent les changements d'états des vantaux (p. ex. : ouvert, fermé). L'état d'un ventail peut changer au cours du temps, soit parce qu'une personne le manipule, soit parce qu'il est asservi à un composant de sécurité ou encore soit parce qu'il se ruine du fait de la chaleur dégagée par l'incendie. Les vannes ont d'autant plus de degrés de liberté que le ventail peut prendre beaucoup de positions différentes (p. ex. : fermé, un quart ouvert, demi ouvert, grand ouvert...).

De plus, dans cet exemple, aucun échange d'énergie entre locaux par l'intermédiaire des parois n'est considéré puisqu'aucun flux ne lie les deux boîtes parois dans la Figure 45. Autrement dit, une hypothèse de flux nul à l'interface entre deux parois adjacentes est posée.

⁴⁸ Un bloc-porte se compose de la partie fixe d'une porte (l'embrasure ou le dormant) et de la partie mobile de cette porte (le ventail)

III.B.c) Synthèse

Trois remarques peuvent être tirées des exemples précédents.

Premièrement, CIFI 2009, le modèle physique de SCHEMA-SI, peut être représenté sous forme graphique, à l'aide du langage ISI-Systema. Pour y parvenir, la masse gazeuse et l'énergie interne ont été considérées comme des éléments, les zones comme des boîtes et les échanges entre zones comme des flux.

Deuxièmement, ce modèle graphique, puisqu'il est fonction de la géométrie du bâtiment, est **spécifique à une étude**.

Troisièmement, ce modèle permet d'une part de communiquer le modèle physique sans entrer dans les détails de modélisation ; et d'autre part **de greffer des événements dont l'occurrence impacte le modèle physique**. Ce dernier point est assuré par l'intermédiaire de vannes, pouvant être bougées par un processus d'action. En contrepartie, l'expert en sécurité incendie doit mener une réflexion quant à la mise en équations de ces perturbations des flux massiques et énergétiques dans le modèle physique (p. ex. : comment modéliser l'extinction, l'ouverture de porte...).

III.C Comportement humain

Le comportement humain peut se découper en deux phases :

- comportement avant la prise de conscience du danger ;
- comportement après la prise de conscience du danger.

Par conséquent, la prise de conscience du danger par un individu ainsi que son comportement avant et après cet événement doivent être représentés.

Le comportement avant la réalisation de la situation de danger consiste à vaquer à ses occupations. *In fine*, en sécurité incendie, la connaissance de ses occupations est plutôt importante pour localiser la personne au cours du temps que pour savoir précisément ce qu'elle fait et pourquoi.

A l'inverse, le comportement après la prise de conscience du danger requiert une description plus poussée, et il est possible de décomposer ce comportement en actions du type :

- déplacement (dans le but d'évacuer, de se confiner, de lutter contre le feu...) ;
- propagation de l'alerte ;
- secours aux victimes ;
- lutte contre le danger.

De plus, pour mener à bien ses actions, un individu peut être amené à manipuler des vantaux (p. ex. : ouvrir une porte, la refermer derrière lui, la déverrouiller, briser un vitrage...)

Enfin, à tout instant et ce quel que soit son état d'alerte, un individu peut, sous l'effet des sources de danger, perdre (temporairement ou totalement) sa capacité d'agir. Ce point sera traité dans la partie III.E.b).

Remarque :

À ce jour, SCHEMA-SI n'intègre pas de modèle continu d'évacuation des personnes et cette évacuation est représentée comme une **succession d'événements discrets**. Pour cette raison, tous les exemples suivants correspondent à une description événementielle du comportement humain. Toutefois, il est important de noter que le langage, étant

adapté pour représenter une description hybride, permettra d'épouser les évolutions potentielles de SCHEMA-SI.

III.C.a) Prise de conscience du danger

En admettant que le message « danger dans l'établissement » soit un élément noté *i*, qui puisse être propagé dans le système ; l'individu peut alors être considéré comme une entité capable de mémoriser (*processus de stockage*) cet élément lorsqu'il le reçoit. Se basant sur ce principe, l'exemple de la Figure 46 peut être construit. Dans cet exemple, l'individu peut détecter la fumée (*représentée par une boîte fonctionnalisée d'un processus de création d'information*). La fumée est alors considérée comme un signal de danger c'est-à-dire un signe détectable de la présence d'un feu dans l'établissement.

Remarque :

Une source de danger est un vecteur de danger, tandis qu'un signal de danger est un vecteur d'information. Cette distinction a été introduite car elle permet de séparer ce qui a trait aux échanges de matière et d'énergie (source de danger) de ce qui a trait aux échanges d'information (signaux de danger).

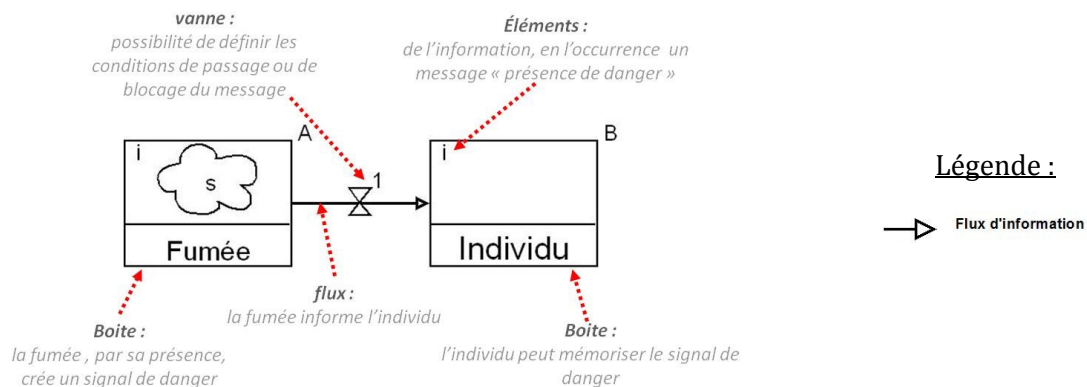
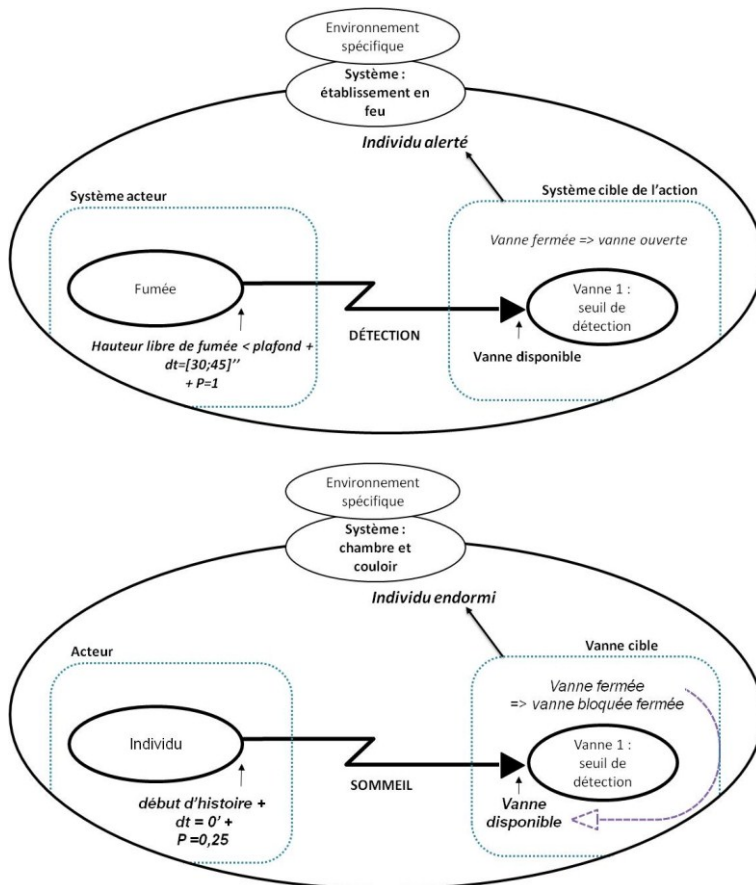


FIGURE 46 : EXEMPLE DE REPRÉSENTATION DE LA PRISE DE CONSCIENCE DU DANGER PAR UN INDIVIDU

La prise de conscience du danger étant événementielle, les possibilités sont binaires : soit le message est reçu et l'individu est alerté, soit le message n'est pas encore reçu et l'individu ignore la présence de danger. En outre, le transfert de message d'une boîte à l'autre se fait instantanément, dès que la vanne est ouverte par un processus d'action. Ainsi, le processus d'action permet de définir les conditions à respecter pour que le message soit transmis ou bloqué. Par exemple, les deux figures suivantes représentent deux processus d'action : l'un exprimant le transfert du message et l'autre son blocage. Enfin, puisque l'information n'obéit pas aux principes de conservation (elle est, par nature, duplicable à loisir), elle peut coexister simultanément dans différentes boîtes. Le transfert d'un message d'alerte n'a donc pas pour effet de vider la boîte source pour remplir la boîte cible ; au contraire, il maintient la boîte source remplie et remplit également la boîte cible (phénomène de mémorisation). Pour être plus rigoureux, il conviendrait d'utiliser plutôt le terme de processus de transmission que de processus de transfert pour ce qui est de l'information.



L'individu détecte la fumée dans un délai compris entre 30 et 45 secondes après que la fumée ait commencé à envahir le local (*hauteur libre de fumée inférieure à la hauteur du plafond*). Cette détection ne peut avoir lieu qu'à la condition que la vanne soit disponible, c'est-à-dire qu'aucun autre processus d'action ne l'ait préalablement bloquée.

Toutefois, une fois sur quatre, l'individu est endormi au début du scénario, ce qui le rend incapable de détecter le danger. Dans ce cas, la vanne V1 est bloquée fermée, et l'individu ne sera donc pas alerté lorsque la fumée envahira le local (*la vanne V1 étant bloquée, le processus précédent ne pourra pas se réaliser*).

III.C.b) Déplacement – évacuation, confinement, intervention

En considérant que chaque local a la capacité d'accueillir des individus, il est possible de représenter les locaux par des boîtes (processus de stockage). Les individus sont alors des éléments notés p (comme « personnes »), qui se déplacent de local en local (de boîte en boîte) par l'intermédiaire des voies de passage (des connections). La Figure 47 illustre un exemple de déplacement dans lequel un individu, initialement dans la chambre peut passer soit dans le couloir (par une porte ; cf. flux d'individu – vanne V1), soit directement dehors (par une fenêtre, si la chambre est de plain-pied ; cf. flux d'individu – vanne V2).

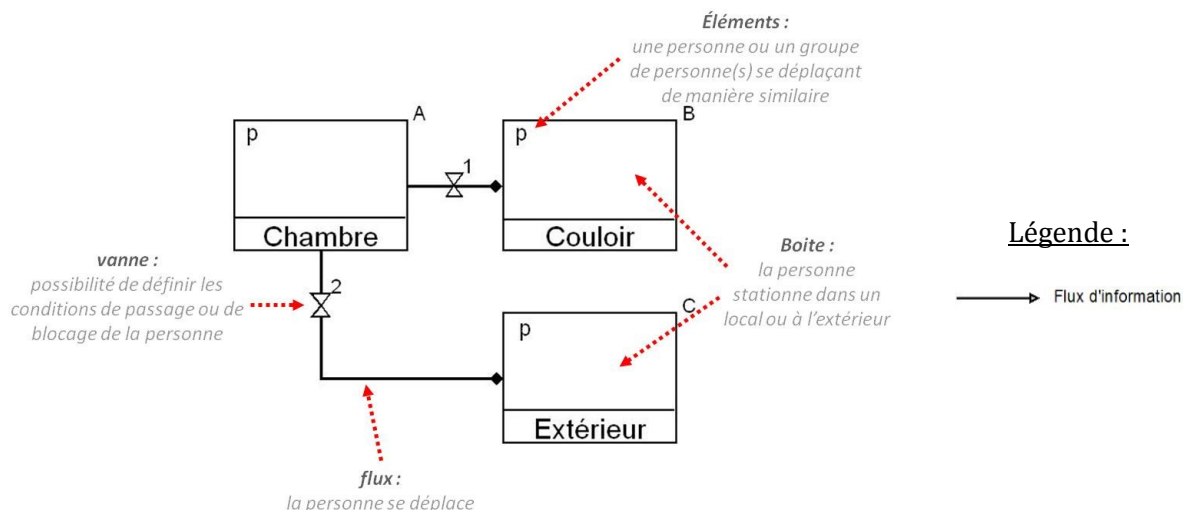
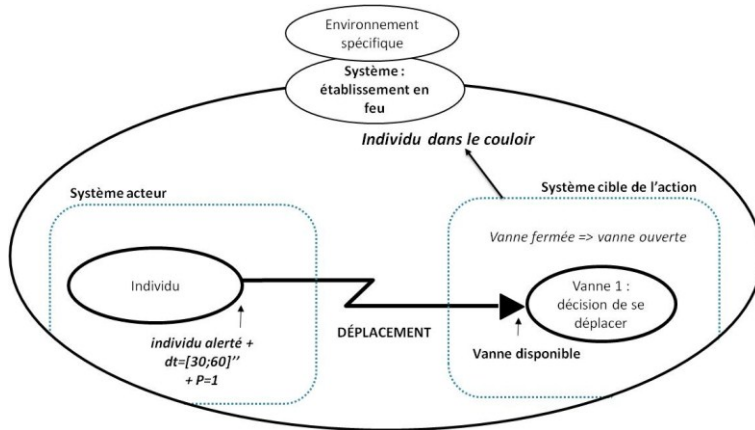
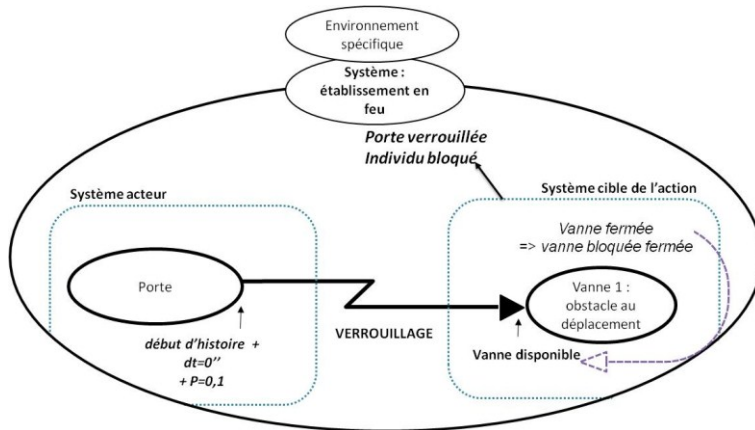


FIGURE 47 : EXEMPLE DE REPRÉSENTATION DU DÉPLACEMENT D'UNE PERSONNE

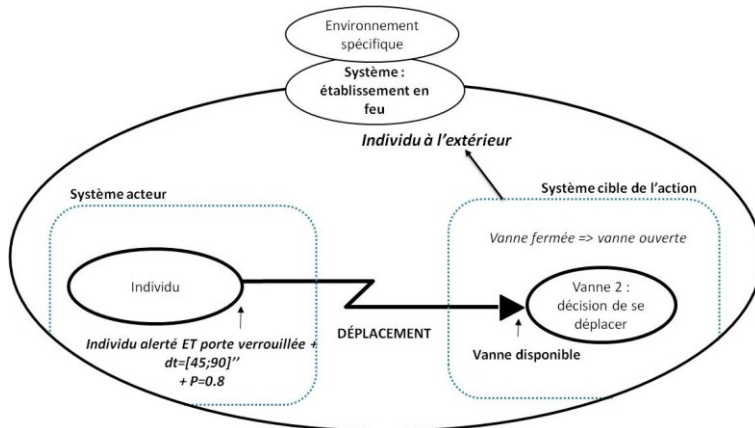
Le déplacement des personnes étant traité de manière événementiel, la description est binaire, c'est-à-dire que soit l'individu (ou le groupe d'individus) est dans la pièce, soit il n'y est pas. En outre, le passage d'un local à un autre se fait instantanément, dès que la vanne est ouverte par un processus d'action. En conséquent, il convient de définir, pour chaque individu ou groupe d'individus, les conditions de passage d'un local à un autre sous forme de processus d'action. À ce titre, deux exemples de processus d'action sont proposés ci-après.



Lorsque la personne est alertée, elle sort de la chambre par la porte dans un délai de 30 secondes à 1 minute (*ouverture de la vanne V1 et transfert de la personne de la chambre au couloir*).



Toutefois, dans 1 scénario sur 10, la porte est initialement fermée à clef, ce qui a pour effet d'empêcher la sortie de la personne (*vanne V1 bloquée, et donc impossibilité de réaliser le processus d'action précédent*).



Dans ce cas, 8 fois sur 10, la personne a l'idée de sortir par la fenêtre, sortie qui lui réclame entre 45 secondes et 1 minute 30 pour être accomplie (*ouverture de la vanne V2 et transfert de la personne de la chambre vers l'extérieur*).

Ainsi, dans cet exemple, la personne reste bloquée à l'intérieur de sa chambre dans 2% des scénarios puisque :

$$\frac{1}{10} \times \left(1 - \frac{8}{10}\right) \times 100 = 2\%$$

porte verrouillée pas d'idée de sortir par la fenêtre

III.C.c) Propagation de l'alerte

De la même manière que pour la prise de conscience du danger, il est possible de représenter :

- toute entité pouvant être alertée ou activée par une boîte (processus de stockage) ;
- un message d'alerte par un élément ;
- les possibilités de communication, d'alerte et d'activation par des connexions et des flux.

Puis, il convient de définir, à l'aide des processus d'action, les conditions à respecter pour que ces échanges d'information se réalisent ou se bloquent.

Dans l'exemple de la Figure 48, un individu - l'individu A -, détecte la fumée dans une chambre. Suite à cela, il peut alerter les secours et activer l'alarme de type « coup de poing » du couloir. Cette alarme, lorsqu'elle retentit, peut à son tour alerter les individus B et C se trouvant dans le hall.

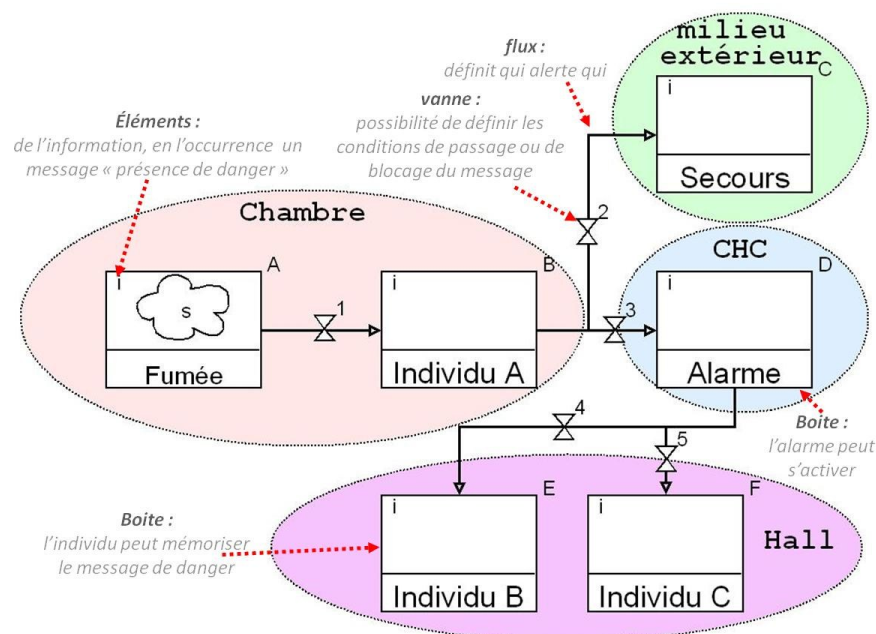
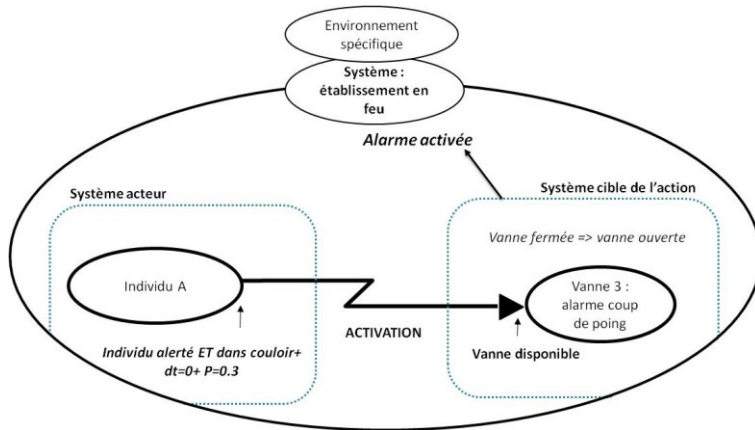


FIGURE 48 : EXEMPLE DE REPRÉSENTATION DE LA PROPAGATION DE L'ALERTE

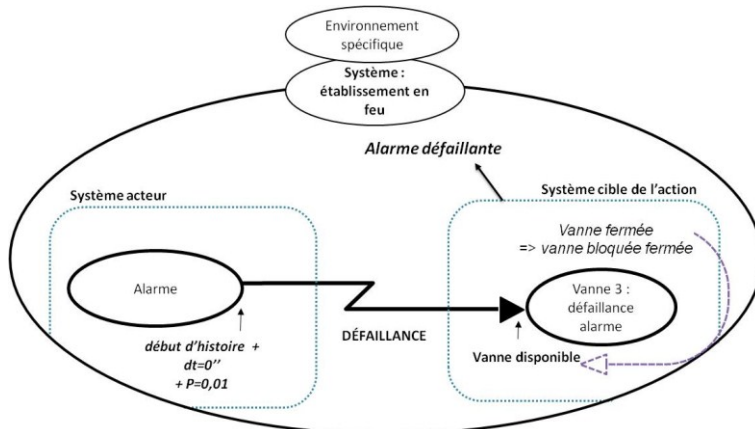
Remarque :

Lorsque de nombreuses boîtes sont impliquées dans la propagation de l'alerte, il est utile de spatialiser les entités représentées par des boîtes par des bulles colorées représentant les locaux et l'environnement, appelé ici milieu extérieur. Lorsque les entités se déplacent, il convient de représenter au moins leur position initiale.

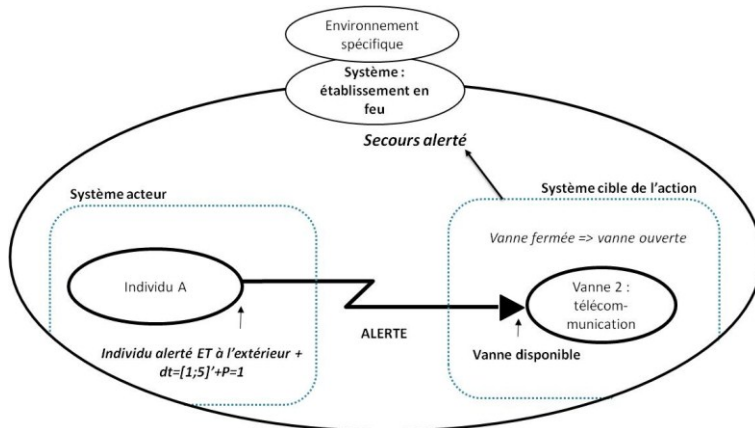
Les processus d'action ci-dessous illustrent quelques conditions de transfert et de blocage du message d'alerte. D'autres processus d'action peuvent être construits, donnant cohérence et variété à la trame (p. ex. : détectabilité de la fumée, réception de l'alarme, sommeil, surdité...).



Lorsque l'individu A est alerté (boite B pleine) et qu'il parvient dans le couloir (événement initiateur), il active l'alarme 3 fois sur 10 (fréquence d'occurrence).



Toutefois, 1 fois sur 100, l'alarme est défaillante et ne s'active pas à la sollicitation (vanne V3 bloquée fermée, impossibilité de réaliser le processus d'action précédent).



Lorsque l'individu parvient hors du bâtiment (événement initiateur), il reprend ses esprits et cherche un téléphone, ce qui lui prend entre 1 à 5 minutes après sa sortie (délai). Une fois ces actions réalisées, il compose le 18 et alerte les secours (ouverture de V2, remplissage de la boîte C).

III.C.d) Secours aux victimes

Lors d'un incendie, le secours aux victimes consiste dans un premier temps à évacuer les victimes afin de les soustraire à la situation de danger. Ce n'est que dans un deuxième temps, lorsque les victimes sont en sécurité, que les soins sont apportés. Dans le cadre d'une étude d'ingénierie, c'est surtout le premier temps qui est important à modéliser car il se déroule à l'intérieur du système.

La Figure 49 ainsi que le processus d'action suivant donnent un exemple de secours aux victimes. Dans cet exemple, un sapeur-pompier peut pénétrer dans une chambre par la fenêtre pour en sortir une victime inanimée.

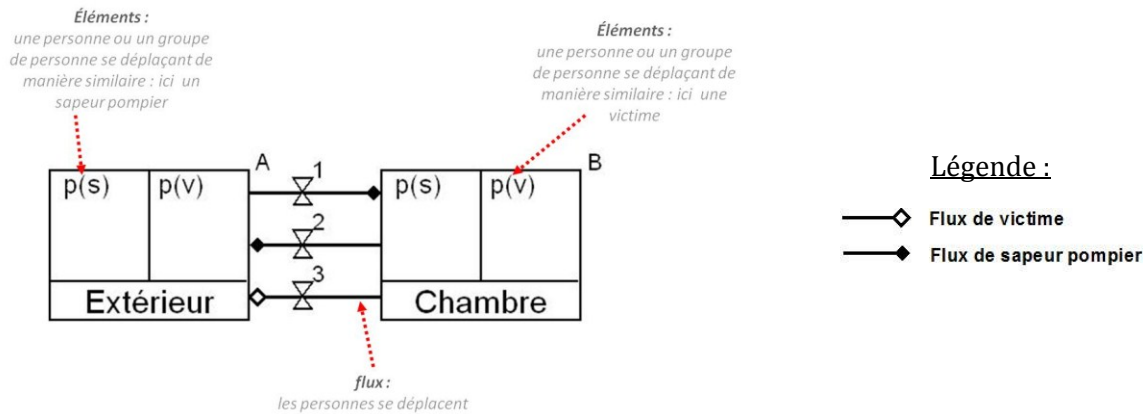
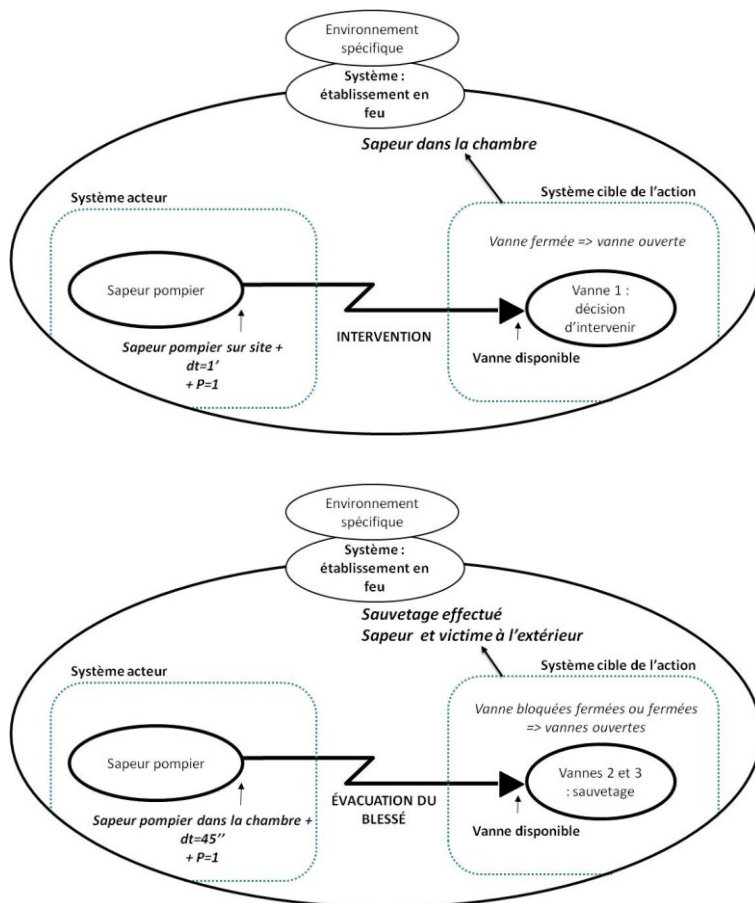


FIGURE 49 : EXEMPLE DE REPRÉSENTATION DU SAUVETAGE D'UNE PERSONNE

Les deux processus d'action suivants détaillent le déroulement de l'intervention de sauvetage.



Le sapeur-pompier, après être arrivé sur site (*événement initiateur*), entre dans la chambre par la fenêtre en 1 minute.

Une fois sur les lieux (*boîte A pleine*), il porte secours à la victime inanimée (*la vanne V3 bloquée représente l'incapacité de la victime à sortir d'elle-même*). Il sort du bâtiment avec la victime (*ouverture simultanée des deux vannes V2 et V3*) en 45 secondes.

Remarque :

Il est possible de définir un seul processus d'action pour deux vannes.

III.C.e) Lutte contre le danger

Les actions de lutte contre le danger ont pour objectif la réduction des sources de danger, telles que le foyer ou la fumée. Ces actions ont donc un impact direct sur le modèle physique, qu'il convient de modéliser (p. ex. : calcul des débits massiques et énergétiques extraits et injectés au

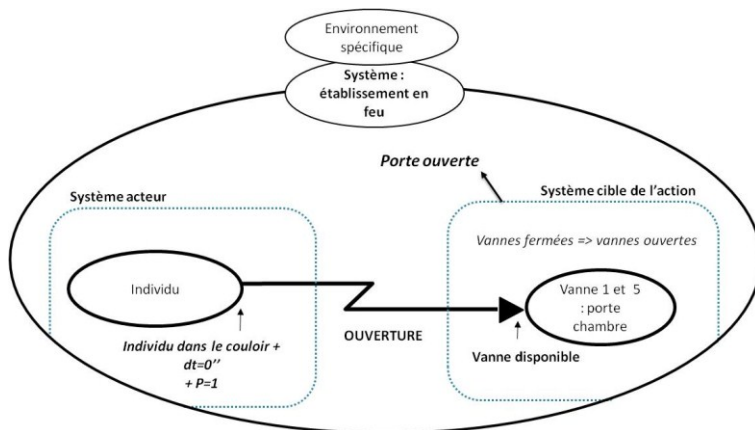
niveau d'une installation de désenfumage mécanique; modélisation du phénomène d'extinction...).

Dans le langage ISI-Systema, ce type d'action se représente par un processus d'action impactant les vannes de masse et d'énergie. Le recours à un processus d'action permet de définir l'entité qui réalise l'action, les conditions à respecter pour que cette action ait lieu ainsi que les flux de masse et d'énergie à modifier dans le modèle physique. Par exemple, une action d'extinction totale menée par les secours peut se représenter par la fermeture des vannes V1, V2 et V3 de la Figure 44. Cette action a pour effet de supprimer le foyer de la chambre, puisque toutes les connexions du foyer avec le reste du système sont interrompues.

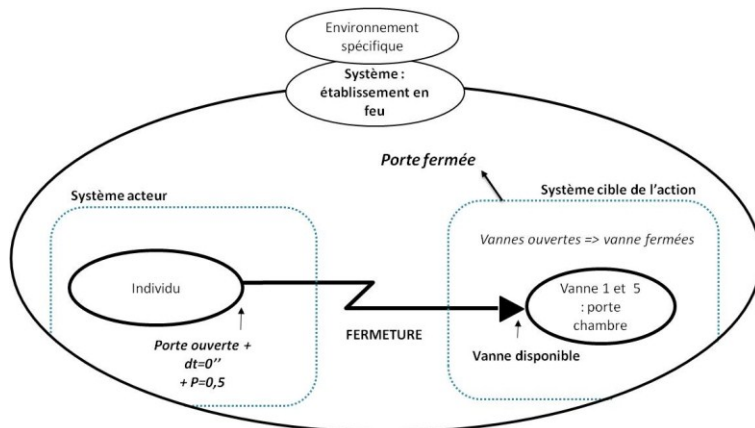
III.C.f) Actionnement de vanteaux

De la même manière, l'ouverture et la fermeture des vanteaux (portes et fenêtres) sont représentées par des processus d'action impactant des vannes du modèle physique.

Par exemple, les processus d'action suivants représentent des exemples d'action qu'un individu peut avoir sur une porte.



Lorsqu'il se déplace de la chambre au couloir (*l'événement initiateur correspond à l'entrée dans le couloir*), l'individu ouvre la porte de la chambre (cf. vannes V1 et V5 de la Figure 45) si celle-ci est fermée (cf. état initial des vannes).



De même, lorsque l'individu se déplace de la chambre au couloir, il ferme la porte de la chambre une fois sur deux. Cette action est vérifiée que la porte ait été initialement ouverte ou que l'individu ait été amené à l'ouvrir pour passer.

Remarque :

Les actions d'ouverture de porte et de déplacement sont définies comme des processus d'action distincts. Ce parti a été pris puisqu'il s'agit d'actions potentiellement indépendantes. En effet, il est possible d'ouvrir une porte sans sortir tout comme il est possible de sortir sans ouvrir une porte si celle-ci l'est déjà.

III.C.g) Synthèse

Les paragraphes précédents permettent de tirer deux conclusions.

Tout d'abord, dans un incendie, un individu est amené à remplir **plusieurs rôles**. Pour cette raison, le comportement humain est décomposé en une multitude de processus élémentaires, et donc également en une **multitude de symboles**. Par exemple, une même personne peut à la fois être représentée par :

- des boîtes stockant de l'information ; car elle peut avoir conscience de la présence de danger dans l'établissement en feu ;
- des flux d'informations ; car elle peut recevoir et émettre l'alerte c'est-à-dire qu'elle peut communiquer ;
- des éléments, eux-mêmes stockés dans des boîtes représentant les locaux et transférés dans des connexions représentant les ouvrants ; car elle peut rester dans un local et/ou se déplacer de local en local en passant à travers les ouvertures ;
- des modèles de processus d'action, car il faut :
 - ✓ définir les conditions pour que les possibilités de communication et de déplacement détaillées ci-avant se réalisent (p. ex. : elle décide de sortir deux minutes après avoir vu le feu) ou s'inhibent (p. ex. : si elle dort, elle ne réalise pas qu'il y a le feu) ;
 - ✓ définir des conditions pour que la personne ait des actions sur le reste du système (p. ex. : elle ouvre la porte quand elle sort, elle tente d'éteindre le feu dès qu'elle le voit, elle emporte un extincteur en sortant).

Ensuite, avec SCHEMA-SI, le comportement humain est représenté par une série d'événements et non par un modèle continu comme c'est le cas pour la masse et l'énergie. Toutefois, les cinq mêmes processus sont utilisés pour décrire le comportement humain. Cela n'est possible que si les conditions suivantes sont respectées :

- il n'y a qu'un seul élément traité (p. ex. : une personne ou un groupe de personnes dont le comportement est similaire, un message d'alerte) ;
- les débits sont infiniment rapides, ce qui revient à adopter une description binaire (p.ex. : soit le message est transmis, soit il ne l'est pas ; soit la personne est dans la pièce, soit elle ne l'est pas) ;
- tous les événements représentant le comportement humain doivent être décrits par des processus d'action (il peut donc y avoir beaucoup de processus d'action dans une trame).

III.D Système technique de sécurité

Deux grandes catégories d'équipements de sécurité sont distingués : ceux qui nécessitent une activation préalable et ceux qui n'en nécessitent pas (tels que certains équipements de protection passive). Les premiers sont activés ou enclenchés dans l'espoir qu'ils génèrent une réponse prédéfinie. Il s'agit par exemple, d'un extincteur ou d'une installation de désenfumage. Très schématiquement, leur fonctionnement, similaire à celui d'un automate, peut se décomposer en deux phases : la réception du stimulus (input) et la réponse (output). Tant l'input que l'output peuvent être de natures diverses. Par exemple, citons un message électrique, le pressage d'un bouton ou l'éclatement d'une ampoule thermosensible pour l'input, et l'émission d'un message électrique, le retentissement d'un signal sonore ou la libération d'un fluide d'extinction pour l'output. A l'inverse, l'action de sécurité des seconds n'est pas assujettie à une commande. Par exemple, une cloison coupe-feu est un équipement de sécurité sans activation préalable.

III.D.a) Équipements nécessitant une activation préalable

Réception de l'input

En considérant l'input comme une information (une commande), il est possible de la représenter avec le langage ISI-Systema comme un élément. Cet élément est alors reçu par une boîte fonctionnalisée d'un processus de stockage, représentant l'équipement à activer.

Génération de l'output

L'output généré par l'entité peut avoir trois fonctions :

- propager l'alerte ;
- lutter contre les sources de danger ;
- faire barrière au danger (isoler les sources des cibles).

La première fonction est représentée avec le langage ISI-Systema, par un flux d'information liant l'entité (une boîte) aux autres entités qu'elle alerte (des boîtes). Les conditions pour que le message soit transmis doivent bien entendu faire l'objet d'un processus d'action.

A l'inverse, les autres fonctions peuvent être représentées par des processus d'action agissant sur d'autres vannes du système (p. ex. : des vannes représentant une porte – cf. *V1 et V5 de la Figure 45* – ou une trappe de désenfumage, des vannes permettant d'éteindre ou de limiter le foyer – cf. *V1, V2 et V3 de la Figure 44* –).

Exemple : détecteur

Dans cet exemple, un détecteur thermostatique s'active dès que la température du gaz avoisinant dépasse 55°C. Son taux de disponibilité est de 100% (une hypothèse optimiste est retenue ici). Un fois alerté, ce détecteur transmet sans délai l'information à un tableau de signalisation, sur lequel une LED⁴⁹ s'allume.

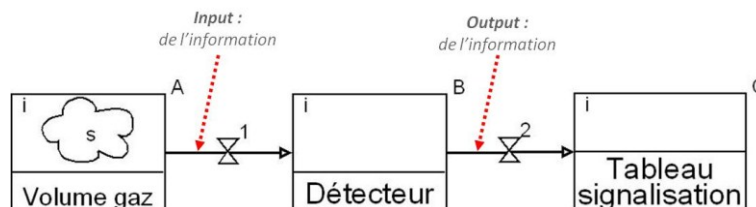
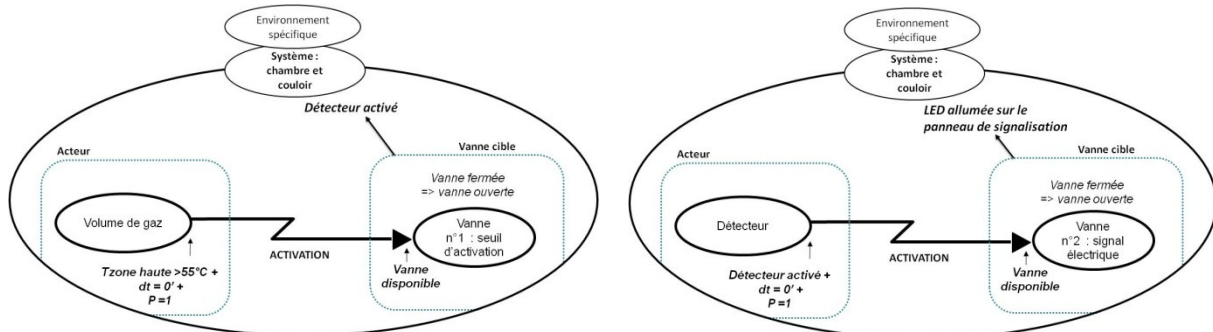


FIGURE 50 : EXEMPLE DE REPRÉSENTATION DE L'ACTIVITÉ D'UN DÉTECTEUR



⁴⁹ Light-Emitting Diode ou diode électroluminescente en français

Exemple : une tête d'extinction automatique

Cet exemple illustre le fonctionnement d'une tête d'extinction automatique. Lorsque la température des gaz sous plafond dépasse 68°C , l'ampoule thermosensible de la tête explose (c'est l'input de l'équipement). En réaction, de l'eau est libérée, ce qui a pour effet de limiter les échanges entre le foyer et le reste du système, et donc, de réduire le débit calorifique libéré. Le taux de réduction (le degré de fermeture des vannes) doit être défini par l'ingénieur en sécurité incendie, en fonction de l'état des connaissances.

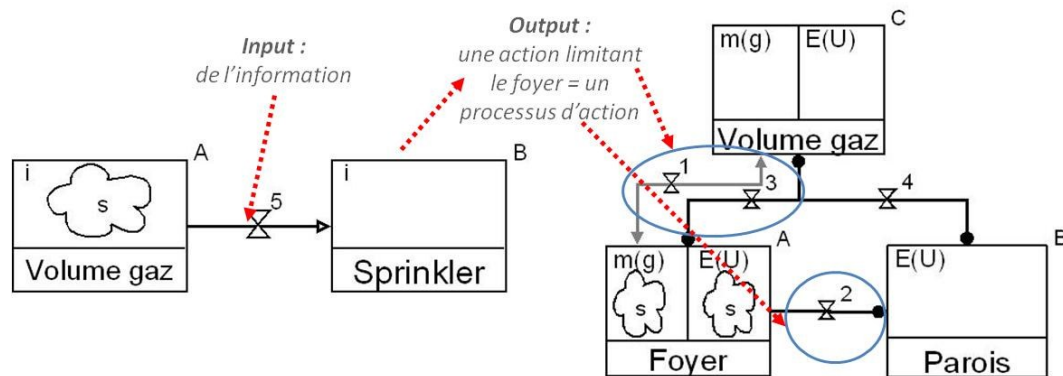
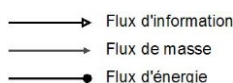
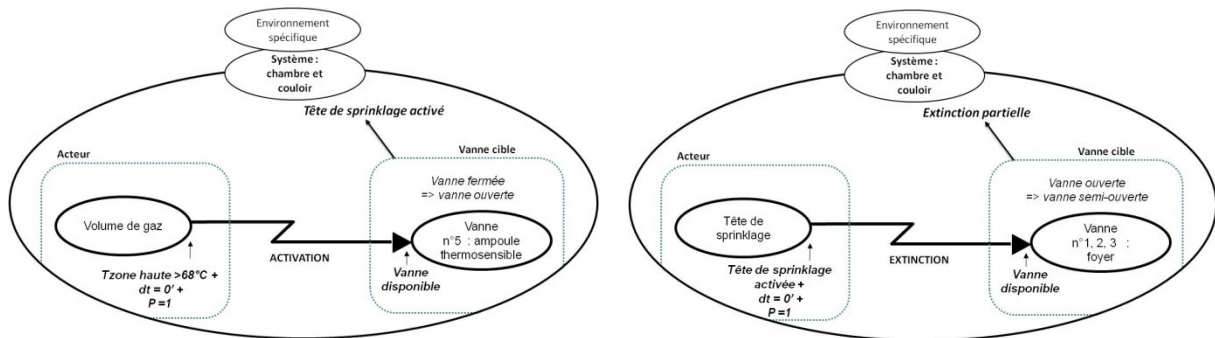


FIGURE 51 : EXEMPLE DE REPRÉSENTATION DE L'ACTIVITÉ D'UNE TÊTE DE SPRINKLAGE

Légende :



Ci-après, les processus d'action impliqués dans cet exemple sont détaillés.



Remarque :

Dans cet exemple, les phénomènes d'interactions entre l'eau et le foyer ne sont pas modélisés par des équations continues (p.ex. : vaporisation de l'eau...), mais par un événement engendrant une diminution du débit calorifique du foyer.

III.D.b) Équipements ne nécessitant aucune activation préalable

Les équipements de protection passive peuvent être représentés de différentes manières, selon l'équipement considéré. Par exemple, un équipement de compartimentage, en modifiant l'organisation interne de l'établissement, découpera l'espace en davantage de volumes de gaz. Ainsi, ces mesures sont représentées dans le graphique traduisant le modèle physique (cf. Figure 45). Autre exemple, une peinture intumescente modifiera la manière dont les parois s'échauffent, et donc sera prise en compte dans le processus de stockage de la boîte représentant les parois (cf. boîte C dans la Figure 45).

III.D.c) Synthèse

Tout comme pour le comportement humain, le comportement d'un équipement de sécurité est décomposé en une succession de plusieurs processus élémentaires, représentés par plusieurs symboles. Par exemple, la représentation d'un même équipement peut faire intervenir :

- une boîte stockant de l'information s'il peut être activé ou actionné ;
- des flux d'informations s'il peut recevoir l'information d'activation (input) et/ou transmettre cette information (output) ;
- des modèles de processus d'action, car il faut :
 - ✓ définir les conditions pour que les possibilités d'activation détaillées ci-avant se réalisent (p. ex. : le détecteur s'active si la température dépasse 55°C) ou s'inhibent (p. ex. : un détecteur défaillant ne peut pas jouer ses rôles de détection et de transmission de l'alerte) ;
 - ✓ définir des conditions pour que l'équipement ait des actions sur le reste du système (p. ex. : lorsqu'elle est déclenchée, la tête de sprinkler déverse de l'eau sur le foyer et en diminue le débit calorifique).

III.E Effets des sources de danger sur les cibles

Dans le domaine des sciences du danger, l'entité (ou la partie de l'entité) soumise aux dangers est appelée cible. Les effets des sources de danger sur la cible varient de la perturbation à la destruction. Dans le domaine de la sécurité incendie, les sources de dangers sont principalement le feu et la fumée tandis que les cibles sont, par exemple :

- les personnes ;
- le bâtiment ;
- un équipement du bâtiment ;
- ou encore un équipement du système de sécurité.

Ces cibles peuvent être altérées au cours du temps ; altération qu'il convient de modéliser. Cette modélisation passe par la définition de critères de seuil, dont le dépassement a pour effet une altération prédéfinie de la cible. Dans le cas de l'utilisation de SCHEMA-SI, le choix de ces critères dépend :

- des connaissances disponibles ;
- de la capacité à modéliser les conséquences de la ruine de la cible sur le système ;
P. ex. : calcul de débits de masse et d'énergie à travers un ouvrant ruiné.
- et du degré de finesse du modèle physique de zones.
P. ex. : impossibilité de définir un critère d'intoxication par le CO si le modèle physique ne prédit pas l'évolution du taux de CO au cours du temps.

III.E.a) Destruction, défaillance d'un équipement

Tout équipement du bâtiment (bloc-porte, bloc-fenêtre, parois...) ou du système de sécurité (détecteur, trappe de désenfumage, installation d'extinction automatique) peut être détruit au cours du sinistre ou être initialement défaillant.

Destruction

Différents modèles de ruine peuvent être implémentés et seul un exemple sera présenté ici. L'exemple suivant (cf. Figure 52) correspond à un modèle de ruine basé sur l'énergie totale reçue par la surface du ventail exposée aux gaz chauds.

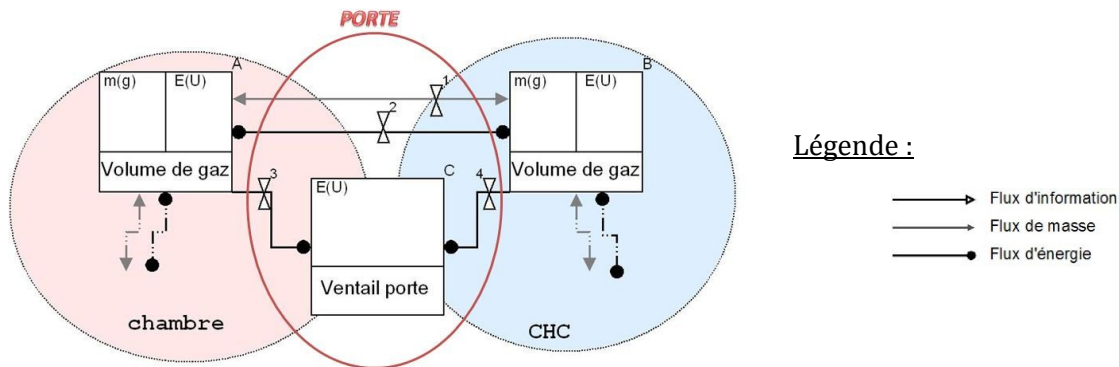
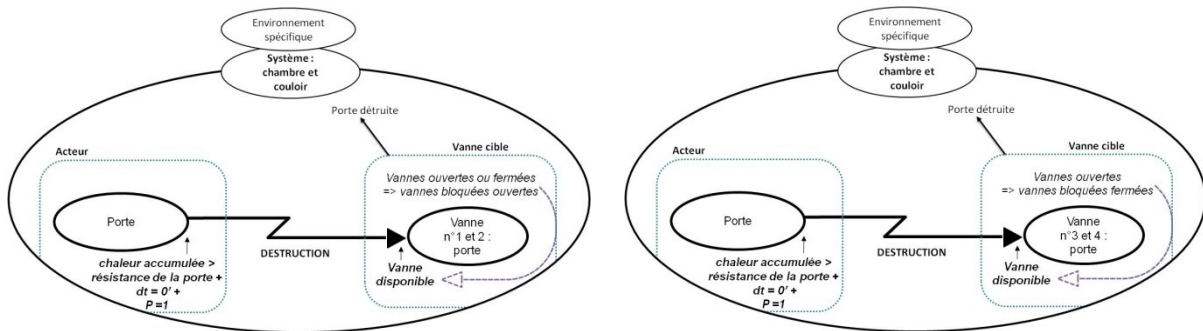


FIGURE 52 : EXEMPLE DE REPRÉSENTATION DE L'ACTIVITÉ D'UNE PORTE

Dans cet exemple, la porte reçoit des flux incidents des volumes de gaz qu'elle met en relation (cf. flux commandés par les vannes V3 et V4). Une partie de l'énergie reçue s'accumule dans la porte (processus de stockage - cf. boîte C).

Dans cet exemple, la ruine de la porte se représente par les deux processus d'action suivants.



Lorsque l'énergie reçue dépasse une énergie critique traduisant la performance de résistance au feu du ventail, ce dernier se ruine. Suite à cette destruction :

- le ventail ne reçoit plus de flux incidents (les vannes V3 et V4 sont bloquées fermées – processus de droite) ;
- l'ouverture entre la chambre et le couloir est béante, laissant passer gaz et énergie (les vannes V1 et V2 sont bloquées ouvertes – processus de gauche).

Dans cet exemple, l'énergie accumulée dans la porte n'est pas restituée au volume de gaz. Elle est donc perdue.

Remarque :

Le présent modèle de ruine est un modèle hybride de comportement de porte, puisqu'il existe un couplage entre des grandeurs continues traduisant l'échauffement du ventail (représenté par la boîte C) et l'état discret intact/détruit.

Défaillance

Plusieurs manières de représenter la défaillance sont possibles et seul un exemple sera présenté ici. Reprenons l'exemple d'une alarme initialement défaillante dans un scénario sur cent. Dans cet exemple, l'alarme peut être activée (cf. boîte B de la Figure 53) par un individu (cf. boîte A et flux commandé par la vanne V1). Initialement, l'alarme n'est pas activée, c'est-à-dire que la boîte B est vide et que la vanne V1 est fermée. La défaillance initiale de l'alarme est représentée par le processus d'action ci-dessous.

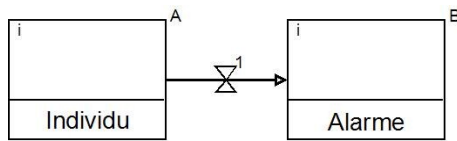
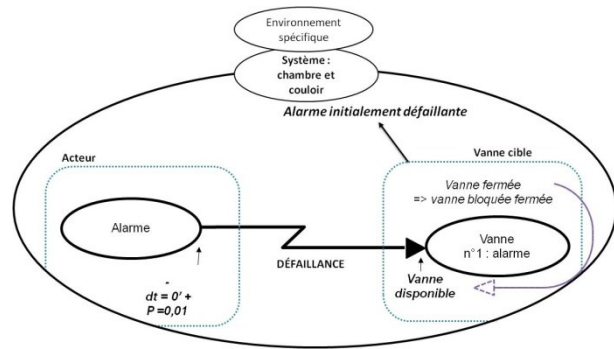


FIGURE 53 : EXEMPLE DE REPRÉSENTATION DE L'ACTIVITÉ D'UNE ALARME



Légende :

→ Flux d'information

Ce processus d'action se réalise dans un scénario sur cent, immédiatement au début du scénario. En effet, lorsque l'événement initiateur n'est pas indiqué, le début du scénario est pris comme événement de référence et dans cet exemple, le délai devant s'écouler entre l'événement de référence et l'événement étudié est nul. Si ce processus d'action se réalise, la vanne V1 sera bloquée fermée, empêchant ainsi toute activation de l'alarme pour le scénario courant.

III.E.b) Décès, perte de connaissance d'un individu

Le décès d'un individu n'est pas modélisé comme un processus de destruction, mais comme un **ensemble de processus d'action suite auxquels les actions impliquant l'individu ne peuvent plus être réalisées**. En d'autres termes, le décès est symbolisé par l'interruption définitive (blocage de vannes) de toutes les relations qu'entretient l'individu avec le reste du système (il ne se déplace plus, il ne communique plus, il n'ouvre plus de porte, etc.). Des exemples de décès sont disponibles dans l'application pratique (cf. cinquième chapitre).

III.E.c) Synthèse

Avec le langage ISI-Systema, l'altération des cibles est représentée par des processus d'action bloquants, dont l'effet consiste à inhiber les fonctions que la cible altérée ne peut plus remplir (p.ex. : transmettre une alerte, se refermer, se déplacer, etc.). Par ailleurs, la vulnérabilité de la cible est d'autant plus grande que les conditions d'initiation de ces processus d'action sont faciles à atteindre lors d'un scénario (p. ex. : une température seuil très basse, une fréquence d'occurrence proche de 1, etc.).

III.F Synthèse

Des exemples fournis ci-avant, deux constatations apparaissent. Tout d'abord, quatre types d'éléments sont utilisés⁵⁰ : la masse gazeuse, l'énergie interne, le message d'alerte et les personnes. En raison de la cohabitation de ces différents types d'éléments, le modèle construit

⁵⁰ À ce jour, nous n'avons pas eu besoin de plus d'éléments que ces quatre-ci pour résoudre nos études d'ingénierie. Toutefois, au vue du nombre limité d'études traitées et de leur relativement faible degré de complication (et non de complexité !), l'exhaustivité de ces quatre éléments ne saurait être garantie. C'est d'ailleurs pour permettre les évolutions d'ISI-Systema que nous avons cherché à détailler le langage de manière un peu formelle.

pour un cas réel peut être considérable et le graphique résultant peu lisible. Ensuite, tous les événements de la trame doivent impérativement être mis sous la forme de processus d'action. Par conséquent, le nombre de processus d'action à gérer peut être important.

Pour pallier ces difficultés, trois décisions ont été prises.

Tout d'abord, pour augmenter la lisibilité de la trame, nous avons décidé de séparer les types d'éléments en vues : l'une pour la masse gazeuse et l'énergie interne, l'autre pour le message d'alerte et la dernière pour les personnes. Chaque vue, constituée d'un graphique composé de boîtes, de connexions, de flux et de vannes, représente un point-de-vue sur le système, comme cela est illustré dans le tableau suivant. Par ailleurs, un lot de processus d'action est ajouté à chaque vue.

Nom de la vue	Éléments impliqués	Représentation de la vue – point-de-vue sur le système
Physique	masse gazeuse et énergie interne	modèle physique de feu, échauffement des cibles, événements impactant le modèle physique
Information	message d'alerte	propagations de l'alerte : communication interpersonnelle, technique et technico-humaine ; déclenchement et activation des équipements de protection
Mouvement de personnes	individus	parcours d'individus ou de groupes d'individus se déplaçant de manière similaire

TABLEAU 7 : LES TROIS VUES IMPLIQUÉES DANS LA DESCRIPTION D'UNE TRAME

Ensuite, pour faciliter la construction de la trame, nous avons proposé une démarche, c'est-à-dire des actions à entreprendre dans un ordre défini. Cette démarche est détaillée dans le chapitre suivant.

Enfin, dans cette démarche, nous avons proposé des outils pour gérer le nombre d'événements, notamment les séquences d'événements, c'est-à-dire l'ordre dans lequel les événements surviennent lors d'un scénario. Ces outils sont également détaillés dans le chapitre suivant.

IV. DÉMARCHE DE CONSTRUCTION D'UNE TRAME AVEC LE LANGAGE ISI-SYSTEMA

IV.A Présentation générale de la démarche

Dans le but de faciliter la construction d'une trame, une démarche a été construite. Cette démarche incite à réaliser les actions suivantes dans l'ordre indiqué :

- définir les limites précises du système étudié ;
- recenser toutes les entités et définir celles dont l'activité est identique ;
- identifier, parmi les entités, toutes les fonctions qu'elles remplissent et les représenter par des boîtes, des flux et des vannes ;
- recenser individuellement les événements de la trame en construisant tous les processus d'action du système ;
- rechercher les interactions entre ces processus d'action (cf. IV.B.a) ;
- à partir de ces interactions, construire et analyser les séquences d'événements possibles (cf. IV.C) ;
- vérifier la trame, notamment les séquences d'événements (cf. IV.D).

Puisque les quatre premières étapes ont été illustrées tout au long du paragraphe III, seules les trois dernières sont détaillées dans les paragraphes à venir.

IV.B Recherche des interactions entre événements

IV.B.a) Définition des types d'interaction entre événements

Dans les étapes précédentes de la démarche, les événements ont été identifiés de manière indépendante, à l'aide du modèle du processus d'action. Pour reconstituer la vue d'ensemble de la trame, il est nécessaire d'identifier les interactions entre événements. Le langage a été construit pour définir deux types d'interactions entre processus d'action :

- **des enchaînements** : l'occurrence d'un processus d'action, dit **processus initiateur**, entraîne l'occurrence potentielle d'un autre processus d'action, dit **processus initié** ;
- **des empêchements** : l'occurrence d'un processus d'action, dit **processus inhibiteur**, empêche la réalisation d'un autre processus d'action, dit **processus inhibé**.

Concrètement :

- identifier des enchaînements d'événements revient à reprendre les événements terminaux d'un processus d'action et de chercher dans quels autres processus ils apparaissent en tant qu'événements initiateurs, et ainsi de suite tant que ce couplage existe ;
- identifier des empêchements d'événements revient à reprendre les vannes bloquées par un processus d'action et à chercher dans quels autres processus ces vannes apparaissent comme cibles devant être bougées.

Exemple :

Soient les trois processus d'action suivants :

- PA n°1 : ouverture d'une porte par un occupant ;
- PA n°2 : fermeture de cette même porte par un ferme-porte ;
- PA n°3 : ruine thermique de cette porte.

La lecture de la Figure 54 met en lumière les deux types d'interactions entre processus : l'enchaînement en bleu et l'empêchement en orange. D'une part, le processus d'action PA n°1 (ouverture de la porte) conduit au processus d'action PA n°2 (fermeture de la porte) dans 99% des scénarios, car l'événement terminal du processus PA n°1 (porte ouverte) est également l'événement initiateur du processus d'action PA n°2 (porte ouverte) et car la fréquence d'occurrence du PA n°2 est de 99%. D'autre part, le processus d'action PA n°3 (destruction de la porte), s'il survient, empêche la réalisation des PA n°1 et PA n°2 puisque le PA n°3 bloque les vannes V1 et V3 utilisées dans les PA n°1 et n°2.

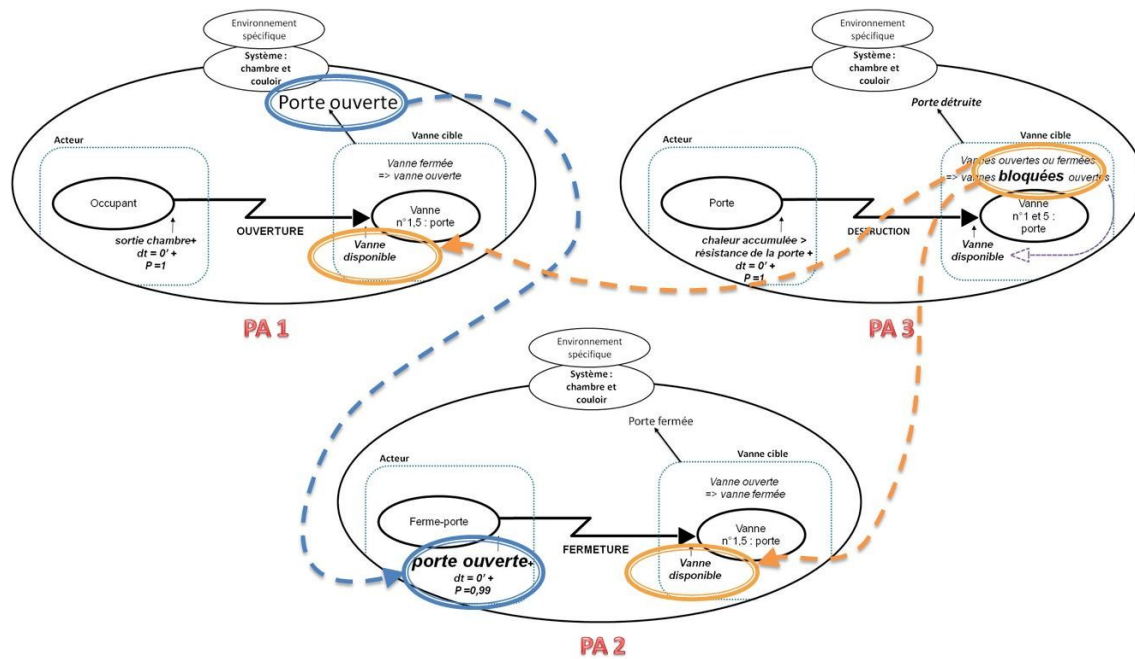


FIGURE 54 : LES INTERACTIONS ENTRE PROCESSUS DISCRETS

IV.B.b) Outil mis à disposition pour gérer les interactions entre événements

Sachant que le nombre de processus d'action d'une trame peut très facilement dépasser la dizaine, un **outil a été construit** à la fois pour repérer l'ensemble des interactions (enchaînement et empêchement) entre les processus d'action et pour évaluer l'impact d'un événement sur les autres événements. Cet outil, inspiré de (Dassens, 2007) porte le nom de **matrice d'interaction**. Une matrice d'interaction est une matrice carrée $N \times N$ (avec N le nombre de processus d'action) dans laquelle il convient de noter l'existence d'enchaînements et d'empêchements entre les processus d'action. Pour y parvenir, le remplissage de la matrice est réalisé ligne par ligne, en regardant pour chaque processus d'action en tête de ligne (i) s'il peut engendrer ou inhiber la réalisation d'un ou de plusieurs processus d'action(s) indiqué(s) en tête de colonne (j). S'il s'agit d'un engendrement, alors l'interaction est de type enchaînement de processus et lien est matérialisé par la lettre I (comme initiation) dans la coordonnée i,j. S'il s'agit d'une inhibition, alors l'interaction est de type empêchement, et lien est matérialisé par la lettre B (comme blocage) dans la coordonnée i,j.

Exemple :

La matrice d'interaction de l'exemple précédent (celui de la porte) est la suivante. Dans cette matrice, la lettre I dans la coordonnée (1,2) signifie que le processus d'action n°1 entraîne le processus d'action n°2. De même, les lettres B aux coordonnées (3,1) et (3,2) signifient que le processus d'action n°3 empêche la réalisation des processus d'action n°1 et n°2.

		Processus initié (I) ou inhibé (B)		
		1	2	3
Processus initiateur (I) ou inhibiteur (B)	1		I	
	2			
	3	B	B	

FIGURE 55 : EXEMPLE TRÈS SIMPLE DE MATRICE D'INTERACTION

La matrice d'interaction est incontournable pour construire les réseaux de Petri car elle renseigne sur la manière dont les événements s'agencent les uns par rapport aux autres au cours du temps. De plus, elle est destinée à identifier l'impact et le degré d'impact d'un processus d'action sur les autres.

Pour illustrer l'évaluation de cet impact, considérons un processus d'action dont les interactions avec les autres processus d'action sont identifiées dans la ligne i et dans la colonne j de la matrice d'interaction. Concernant la ligne i, les trois cas de figure extrêmes suivants sont possibles :

a) La ligne i est vide

Dans ce cas, le processus d'action n'initie ni inhibe aucun autre processus d'action. En d'autres termes, l'occurrence de cet événement ne conditionne pas la suite des événements de la trame. Un tel événement correspond à un processus d'action dit terminal, car il n'a pas de processus enfants (p. ex. : l'extinction).

b) La ligne i est remplie de beaucoup de « I »

Dans ce cas, le processus d'action peut initier de nombreux autres processus d'action. Un tel processus est appelé processus d'action nœud, ce qui signifie que l'événement qu'il représente présente un très fort potentiel d'impact la suite des événements. Son occurrence est stratégique.

c) La ligne i est remplie de beaucoup de « B »

Dans ce cas, l'occurrence de ce processus d'action peut inhiber beaucoup d'autres processus d'action. Ce type d'événement dispose d'un fort potentiel de perturbation sur la suite des événements.

De la même manière, les trois cas de figure extrêmes suivants peuvent être identifiés pour la colonne j :

a) La colonne j est vide

Cette constatation signifie que le processus d'action n'est ni initié ni inhibé par un autre processus d'action. Ce type de processus d'action est dit initial (car sans parents) et ce cas correspond à un événement déclenché soit par les conditions physiques, soit par le début du scénario (p. ex. : la détection).

b) La colonne j est remplie de beaucoup de « I »

Cette constatation indique que le processus d'action peut être initié par de nombreux autres processus d'action. Ce type de processus est également appelé processus « nœud ». Ce cas signifie que l'occurrence de l'événement est augmentée par la redondance des événements y menant.

c) La colonne j est remplie de beaucoup de « B »

Dans ce cas, le processus d'action peut être inhibé par beaucoup d'autres processus d'action. L'occurrence de l'événement représenté est d'autant plus compromise que les « B » sont nombreux.

IV.B.c) Synthèse

Dans le langage ISI-Systema, deux types d'interactions entre processus d'action existent : les enchaînements d'une part et les empêchements d'autre part. Ces interactions sont regroupées dans une matrice, appelée matrice d'interaction. Cette dernière est particulièrement utile pour mesurer leur degré d'interaction entre deux processus d'action. Cette mesure s'obtient en comptant le nombre d'interactions (enchaînements ou empêchements) d'un processus d'action sur les autres. Plus le nombre est élevé, plus l'événement représenté dispose d'un degré d'interaction fort avec les autres événements. En d'autres termes, son occurrence dépend fortement de ce qui s'est passé dans le scénario et/ou conditionne fortement la suite du scénario. Toutefois, pour que cette mesure soit plus fine, il serait nécessaire d'ajouter dans ces matrices les fréquences d'occurrence conditionnelles des événements, définies dans les conditions d'initiation de chaque processus d'action. Cet ajout pourrait être envisagé, en s'inspirant de la méthode MACR détaillée en partie IV.C du premier chapitre. Pour pallier cette limite, ainsi que pour visualiser les séquences d'événements possibles, les représentations arborescentes ont été élaborées. Elles sont détaillées dans le paragraphe suivant.

IV.C Construction et analyse des séquences d'événements possibles dans une trame

La construction et l'analyse des séquences d'événements fait suite à l'identification de l'ensemble des enchaînements et des empêchements de la trame. Cette étape repose sur les arbres d'interaction, qui ont été construits pour **visualiser toutes les séquences d'événements** probabilisées et temporisées de l'ensemble des scénarios. Un scénario correspond à une coupe des arbres, c'est-à-dire une combinaison d'événements en interaction, représentée par certaines branches de l'arbre seulement.

Pour construire ces arbres, il suffit de représenter les interactions entre les événements par un trait bleu lorsqu'il s'agit d'un enchaînement et par un éclair rouge lorsqu'il s'agit d'un empêchement (cf. Figure 56). Dans ces arbres, chaque événement de l'enchaînement est repéré par le numéro du processus d'action qui le représente ainsi que par le nom donné à ce processus. De plus, chaque événement inhibiteur est représenté par un symbole traduisant la nature de l'inhibition (p. ex. : une croix latine pour symboliser le décès, la lettre grecque lambda pour symboliser la défaillance, etc.). *In fine*, l'arbre obtenu représente l'ensemble des séquences événementielles débutant ou finissant par un événement particulier, préalablement défini. Lorsque cet événement est le premier de l'arbre, alors la logique d'analyse est déductive puisque l'on cherche à dérouler la (les) séquence(s) à partir de ce point. A l'inverse, lorsque l'événement étudié est le dernier de l'arbre, alors la logique d'analyse est inductive puisque l'on cherche à remonter la (les) séquence(s) menant à ce point.

IV.C.a) Analyse déductive (arbre des conséquences)

La construction d'un arbre déductif commence par la définition d'un événement de départ, généralement identifié à un processus d'action initial. Il peut donc exister plusieurs arbres déductifs pour une même trame. Ensuite, il faut chercher dans la matrice d'interaction tous les processus d'action **initiés** par ce processus initial et les relier par des traits bleus. Sous chaque trait bleu, la fréquence d'occurrence et le délai du processus d'action initié sont ajoutés. Ils représentent alors la **fréquence et le délai de l'enchaînement**. Ce travail de recherche et de représentation des enchaînements se poursuit pour chaque nouveau processus d'action identifié jusqu'à atteindre un processus terminal. Les branches de l'arbre sont alors construites. La dernière étape consiste à ajouter, au-dessus de chaque processus d'action de l'arbre, autant

d'éclairs rouges que de processus d'action pouvant les inhiber. Au-dessus de chaque éclair, un symbole indiquant la nature de l'inhibition est ajouté.

Exemple :

Considérons qu'un feu démarre dans un bâtiment. Dans cet exemple, l'arbre déductif démarré par l'événement « détection automatique et alarme » (correspondant au processus d'action initial n°7) est celui de la figure suivante. Dans cet exemple, peuvent être dénombrés :

- un processus d'action initial, déclenché par les conditions physiques (cf. le PA n°7 déclenché par le symbole ☁ représentant la fumée) ;
- cinq processus d'action initiés, puisque des traits bleus partant d'un autre processus d'action y mènent (cf. PA n°9, n°13, n°2, n°1, N°9 et n°42) ;
- cinq processus d'action inhibiteur représentés par les symboles rouges au-dessus des cinq éclairs rouges (cf. 🔒, 🔒 et ⚡) ;
- quatre processus d'action inhibés, puisque touchés par des éclairs rouges (cf. PA n°7, n°13, n°2 et n°1).

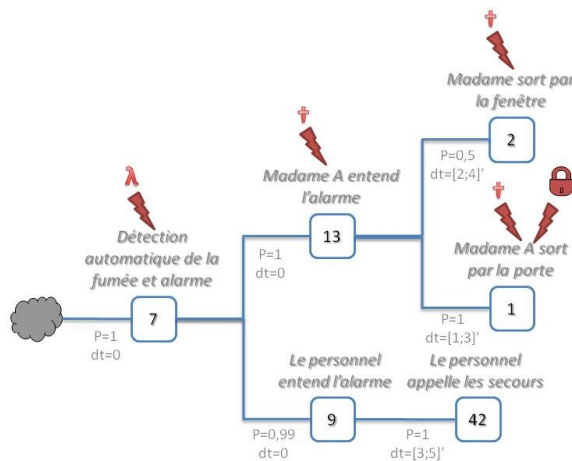


FIGURE 56 : EXEMPLE D'ARBRE DÉDUCTIF

Cet exemple de trame peut se détailler comme suit. La détection est **impossible** si le détecteur est **défaillant** (cf. le symbole 🔒 au-dessus de l'**éclair rouge** impactant le PA n°7). Si la détection survient dans un scénario, deux événements sont **initiés** (cf. les **traits bleus** partant du PA N°7) : d'une part l'alerte de Madame A (cf. PA n°13) et d'autre part celle du personnel (cf. PA n°9). Dans cet exemple, le personnel n'entend l'alarme que dans 99 scénarios sur 100 (cf. la **probabilité d'enchaînement** entre le PA n°7 et le PA n°9). Ensuite, le personnel, appelle les secours (cf. PA n°42) dans un délai compris entre 3 et 5 minutes après avoir été alerté (cf. **délai d'enchaînement** entre le PA n°9 et le PA n°42). Quant à Madame A, après avoir été alertée, elle sort soit par la porte (cf. PA n°1) soit par la fenêtre (cf. PA n°2). Si la porte est **verrouillée** (cf. le symbole 🔒 au-dessus de l'**éclair rouge** impactant le PA n°1), elle **ne peut pas** sortir par cette issue. Enfin, tout au long de son séjour dans le bâtiment, Madame A peut **perdre la vie** et ainsi **sa capacité d'action** (cf. le symbole ⚡ au-dessus des **éclairs rouges** impactant les PA n°12, n°1 et n°2).

En définitive, ces arbres servent l'analyse des séquences événementielles et ce pour deux raisons.

D'une part, ils permettent de mesurer les conséquences d'un événement sur la suite des événements. Ceci explique d'ailleurs pourquoi ces arbres s'apparentent à des arbres des conséquences. D'une manière générale, un événement est d'autant plus influant qu'il initie :

- un grand nombre de branches (il correspond donc d'un processus d'action nœud) ;
- de longues branches.

D'autre part, ils mettent en évidence à la fois l'étendue du rôle d'une entité et sa fragilité. En effet, une entité est d'autant plus importante qu'elle est l'acteur de nombreux processus d'action (c'est-à-dire qu'elle réalise beaucoup d'événements) et que ces processus d'action initient eux-mêmes beaucoup d'autres processus (c'est-à-dire que ses actions ont d'importantes conséquences). En parallèle, une entité est d'autant plus fragile que les processus d'action qu'elle réalise sont susceptibles d'être inhibés par des événements bloquants (c'est-à-dire que ses actions peuvent être contrecarrées).

IV.C.b) Analyse inductive

La construction d'un arbre inductif commence également par la définition d'un événement de départ, généralement identifié à un processus d'action terminal. Ensuite, il faut chercher dans la matrice d'interaction tous les processus d'action **initiateurs** de ce processus terminal et les relier par des traits bleus. La suite de la construction est identique aux arbres déductifs, à la différence près que l'on cherche à remonter l'enchaînement (et donc à trouver les processus initiateurs) jusqu'à trouver un processus d'action initial.

Exemple :

Reprenons l'exemple précédent (cf. Figure 56) et cherchons toutes les séquences d'événements pouvant mener au processus d'action terminal « Madame A sort par la porte ». Dans cet exemple, deux branches d'arbre y mènent : celle initiée par de la détection humaine (cf. PA n°15) et celle initiée par de la détection automatique (cf. PA n°7). Il y a donc redondance, ce qui signifie que Madame A tente de sortir par la porte qu'elle ait pris conscience du danger par elle-même (cf. PA n°15) ou par l'intermédiaire de l'alarme (cf. PA n°13). De plus, dans cet exemple, Madame A ne voit pas le foyer dans un scénario si elle dort (cf. le symbole **Zz** au-dessus de l'**éclair rouge** impactant le PA n°15). Les autres éléments sont identiques à ceux de l'exemple du paragraphe IV.C.a).

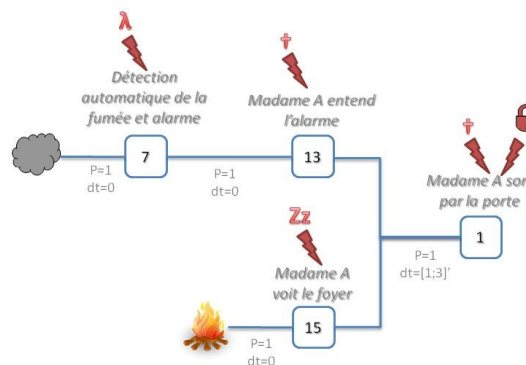


FIGURE 57 : EXEMPLE D'ARBRE INDUCTIF

En définitive, ces arbres servent à l'analyse des séquences événementielles en mettant en évidence le degré de redondance des branches menant à un événement. En effet, à chaque fois qu'une redondance existe, un nœud apparaît dans les arbres. En général, il suffit qu'une seule des branches menant au nœud se réalise pour causer l'événement du nœud. Ainsi, avant les simulations, il est possible de déduire qu'un événement a d'autant plus de chance de se réaliser :

- que de nombreuses branches y mènent ;
- que les fréquences d'enchaînement sur ces branches sont proches de un ;
- que les branches sont peu soumises aux ruptures, c'est-à-dire que peu de processus d'action inhibiteurs les impactent ;

- que les ruptures sont peu fréquentes, c'est-à-dire que les processus d'action inhibiteurs sont durs à réaliser (soit leur fréquence d'occurrence est proche de zéro, soit leur événement initiateur est rare).

IV.D Vérification des séquences et expression des contraintes de séquençage

Pour assurer un séquençage correct des événements, il est essentiel d'identifier parmi les séquences de la trame celles qui n'ont pas de sens (p. ex. : dans l'exemple de la Figure 56, il apparaît que Madame A ne peut pas en même temps sortir par la porte et par la fenêtre). Pour y parvenir, les arbres déductifs sont utilisés. Concrètement, au niveau de chaque nœud de ces arbres, il est nécessaire de se demander si la réalisation de toutes les branches partant du nœud dans un même scénario a un sens (choix d'une porte « ET » ou « OU » au niveau des nœuds).

Si la réponse à cette question est négative (cas d'une porte « OU »), il est impératif de vérifier que les conditions d'initiation des premiers processus d'action des branches incompatibles sont construits de manière à ne jamais être validés dans le même scénario. Si ce n'est pas le cas, alors l'ajout de contraintes de séquençage est requis pour assurer le respect de la porte « OU ».

Si la réponse à cette question est positive (cas d'une porte « ET »), alors il faut se demander si l'ordre dans lequel les événements de branches différentes se réalisent importe (p. ex. : une branche ne peut pas commencer avant que l'autre ne soit finie). Si c'est le cas, il est impératif de vérifier que les délais posés ne permettent jamais des synchronisations erronées (c'est-à-dire que l'intersection des intervalles n'est pas nulle) ou, à défaut, d'ajouter des contraintes de séquençage.

Exemple :

L'arbre déductif du paragraphe IV.C.a) présente deux nœuds : l'un au niveau du processus d'action n°7 et l'autre au niveau du processus d'action n°13. Le premier correspond à une porte ET puisque dans un même scénario, l'alarme peut à la fois alerter Madame A et le personnel. De plus, puisque ces deux événements peuvent être simultanés, aucune contrainte de séquençage n'est requise. Au niveau du deuxième nœud, il convient de placer une porte OU. En effet, Madame A ne peut pas à la fois sortir par la porte et par la fenêtre dans un même scénario. Il convient donc de vérifier que ces deux événements ne peuvent pas se réaliser dans un même scénario, auquel cas une contrainte de séquençage doit être ajoutée. Après examen, il apparaît que, pour cet exemple, une contrainte est requise. En effet, si dans un scénario, la porte n'est pas verrouillée, alors ces deux événements incompatibles peuvent se réaliser. Un exemple de contrainte adéquate est « Madame A ne peut sortir par la fenêtre qu'à condition que la porte soit verrouillée ». D'autres contraintes plus ou moins compliquées peuvent évidemment être imaginées.

Remarque :

L'utilisation d'autres outils que les arbres, comme par exemple, le diagramme de séquence d'UML2 est également envisageable pour identifier les contraintes de séquençage à ajouter.

**SYNTHÈSE DU
CHAPITRE :**

Nous avons construit un langage de modélisation capable de représenter l'activité de chaque entité grâce à cinq processus, tout en conservant la vue d'ensemble (c'est-à-dire l'activité du système) grâce aux interactions entre ces processus. De plus, ce langage offre l'avantage de construire des modèles graphiques suffisamment simples pour être communicables à un groupe de travail, tout en permettant à l'ingénieur de la sécurité incendie de se poser des questions relatives à la modélisation des phénomènes physiques.

Nous avons l'intuition que ce langage de modélisation peut être traduit en langage réseaux de Petri. Cette intuition a été explorée, exploration qui est présentée au chapitre suivant.

Quatrième chapitre : ÉLABORATION DE LA DÉMARCHE DE TRADUCTION D'UN MODÈLE SYSTÉMIQUE EN RÉSEAUX DE PETRI

OBJECTIFS DU CHAPITRE :

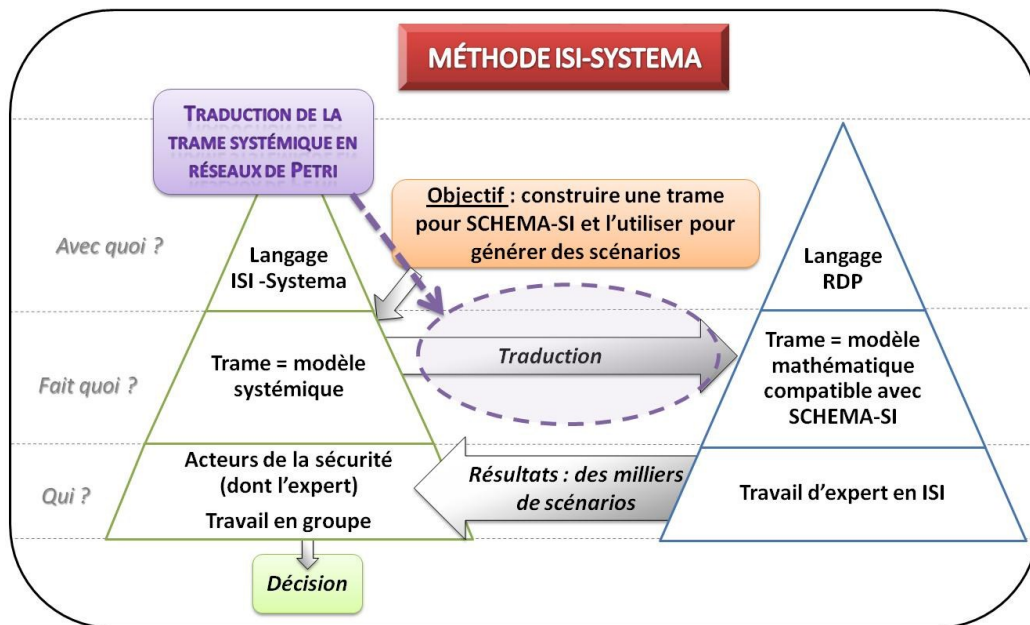
Ce chapitre détaille la démarche à mettre en œuvre pour construire des réseaux de Petri à partir d'un modèle systémique. Toutefois, il existe plusieurs manières de les construire. Le présent chapitre n'en présente qu'une, celle qui a semblé être la plus générale et la plus automatisable.

MÉTHODOLOGIE :

Pour construire des réseaux de Petri, il faut d'abord identifier l'ensemble des réseaux élémentaires à créer. Ensuite, il faut suivre la démarche de traduction établie pour chaque réseau de Petri élémentaire.

Pour rendre la démarche plus compréhensible, nous allons d'abord présenter trois exemples de réseaux achevés, puis les utiliser pour faire un parallèle entre le modèle systémique et les réseaux de Petri. Enfin, la démarche sera présentée et illustrée sur un cas simple.

POSITIONNEMENT DU CHAPITRE VIS-À-VIS DE LA MÉTHODE



I. IDENTIFICATION DES RÉSEAUX ÉLÉMENTAIRES À CRÉER

Rappel :

Le formalisme de réseaux de Petri, détaillé dans la partie III.B du premier chapitre, s'appuie sur une description orientée objet. Chaque objet impliqué dans la trame est représenté par un **réseau de Petri élémentaire (RDPE)** à l'exception du gaz présent dans les locaux, dont les caractéristiques à chaque instant sont entièrement calculées par CIFI 2009.

La première étape de la traduction consiste à identifier, parmi les différentes **entités** du modèle systémique, celles pour lesquelles la construction d'un RDPE s'avère nécessaire. Ces entités sont alors également appelées objets. Il y a donc toujours plus d'entités que d'objets dans une trame. Concrètement, un objet est une entité ne représentant pas un volume de gaz.

Exemple :

Considérons un exemple de trame présentant les treize entités suivantes :

- un volume de gaz dans une chambre => *CIFI 2009*
- un volume de gaz dans un couloir => *CIFI 2009*
- un foyer dans la chambre => *1 RDPE*
- des parois dans la chambre => *1 RDPE*
- des parois dans le couloir => *1 RDPE*
- une porte entre la chambre et le couloir => *1 RDPE*
- une porte entre le couloir et l'extérieur => *1 RDPE*
- un ferme-porte sur la porte de la chambre => *1 RDPE*
- un détecteur dans la chambre => *1 RDPE*
- une alarme générale => *1 RDPE*
- un occupant => *1 RDPE*
- un deuxième occupant => *1 RDPE*
- une équipe de secours => *1 RDPE*

Soit, un total de onze objets, chacun représenté par un RDPE.

Rappel :

Chaque objet k est représenté par un réseau de Petri élémentaire (RDPE). Chaque réseau de Petri élémentaire se compose d'une structure, d'un marquage et d'annotations.

La structure se compose :

- de places
- de transitions
- d'arcs

Le marquage se compose :

- de jetons répartis dans les places

Les annotations se composent :

- de variables
- de conditions de sensibilisation
- de fonctions de jonction
- de fonctions continues

II. EXEMPLES DE RÉSEAUX DE PETRI ÉLÉMENTAIRES CONSTRUITS À PARTIR D'UN MODÈLE SYSTÉMIQUE

Afin de rendre la démarche de traduction plus compréhensible, des exemples sont fournis. Les exemples retenus concernent trois objets suivants, issus de la trame présentée ci-avant :

- la porte entre la chambre et le couloir ;
- l'occupant ;
- le ferme-porte.

Après avoir identifié les trois objets dans le modèle systémique représentant la trame, les RDPE représentant ces objets seront commentés les uns après les autres. Ensuite, ils seront utilisés pour tirer des enseignements sur le fonctionnement des RDPE construits avec la démarche.

Remarque :

Les modèles de comportements présentés dans ces exemples n'ont qu'un rôle illustratif et ne sauraient traduire l'intégralité des modèles de comportements imaginables.

II.A Extraits du modèle systémique concernant ces exemples

Les extraits du modèle systémique détaillant les comportements des trois exemples sont présentés ci-après.

Extrait de la vue physique

Parmi les trois exemples, seule la porte apparaît dans la vue physique puisqu'elle est la seule à impacter les flux de masse et d'énergie. La Figure 58 est un extrait de la vue physique sur lequel la porte apparaît. Cette porte met la chambre et le couloir en communication. Des flux de gaz et d'énergie peuvent s'établir entre les locaux, au travers de la porte (cf. vannes V1 et V2). De plus, la porte s'échauffe (cf. boîte C et vannes V3 et V4).

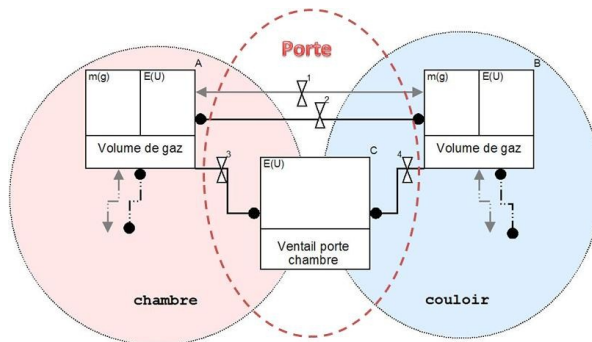


FIGURE 58 : LA PORTE DANS LA VUE PHYSIQUE

A ce stade, précisons que cette porte a deux états d'ouverture : soit elle est ouverte, soit elle est fermée. Par ailleurs, elle est initialement ouverte dans 80% des scénarios et initialement fermée dans les 20% restant.

Extrait de la vue mouvement des personnes

Parmi les trois exemples, seul l'occupant apparaît dans la vue mouvement des personnes car il est le seul à pouvoir se déplacer (cf. élément p(o)). L'occupant, initialement dans la chambre, peut se déplacer vers le couloir (cf. vanne V5), puis vers l'extérieur (cf. vanne V6).

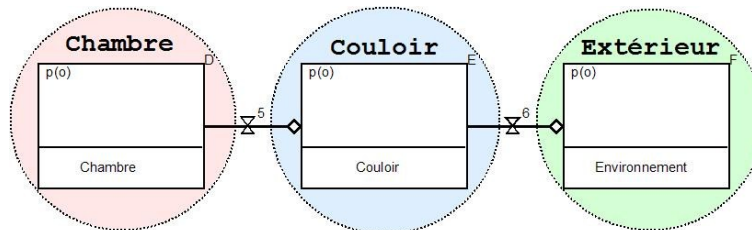


FIGURE 59 : L'OCCUPANT DANS LA VUE MOUVEMENT DES PERSONNES

Extrait de la vue information

Parmi les trois exemples, seul l'occupant apparaît dans la vue information car il est le seul des trois à pouvoir prendre conscience de la présence d'un danger (cf. boîte H). L'occupant peut être

alerté par l'avertisseur sonore (cf. vanne V7). Lorsqu'il est alerté, il peut transmettre cette alerte aux secours (cf. vanne V8).

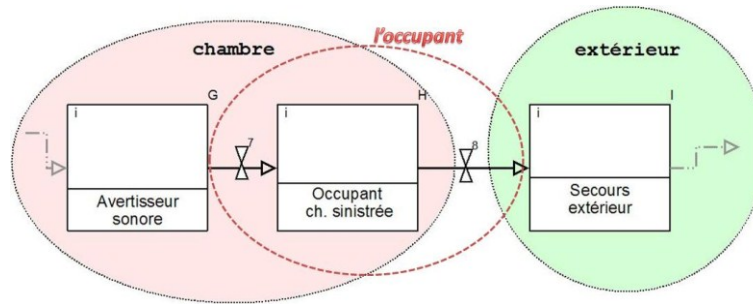
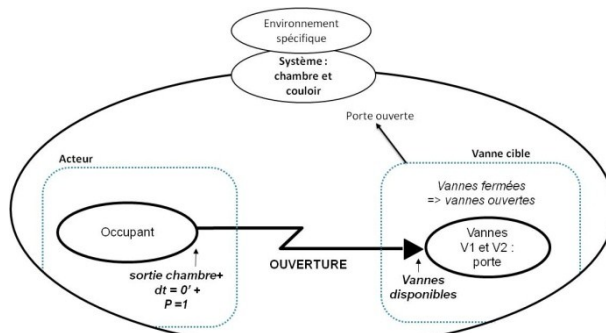


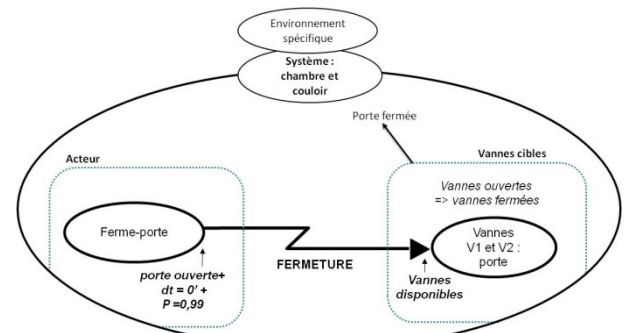
FIGURE 60 : L'OCCUPANT DANS LA VUE INFORMATION

Processus d'action impliqués dans les exemples

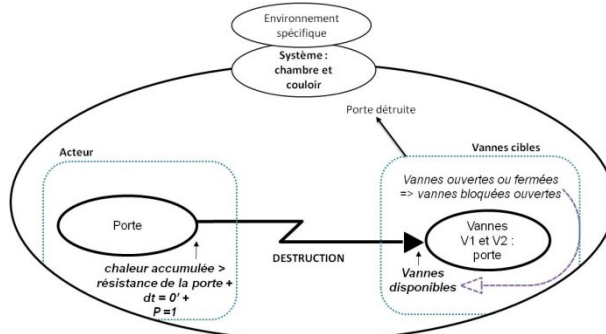
Les dix processus d'action suivants décrivent les événements utilisés dans les trois exemples.



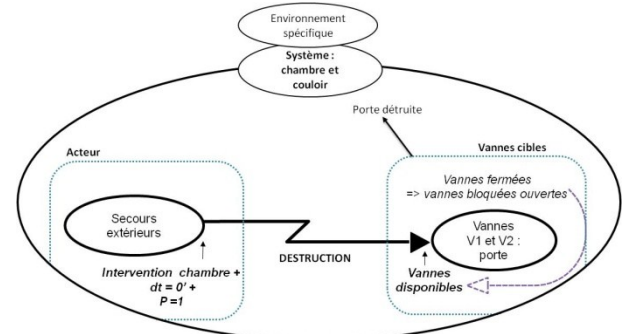
PA 1 : OUVERTURE DE LA PORTE PAR L'OCCUPANT



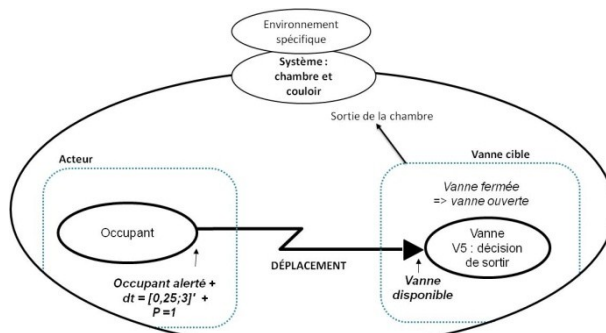
PA 2 : FERMETURE DE LA PORTE PAR LE FERME-PORTE



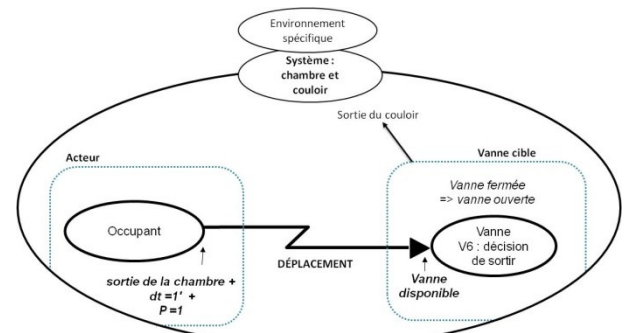
PA 3 : RUINE THERMIQUE DE LA PORTE



PA 4 : DESTRUCTION DE LA PORTE PAR LES SECOURS



PA 5 : SORTIE DE L'OCCUPANT DE LA CHAMBRE



PA 6 : SORTIE DE L'OCCUPANT DU COULOIR

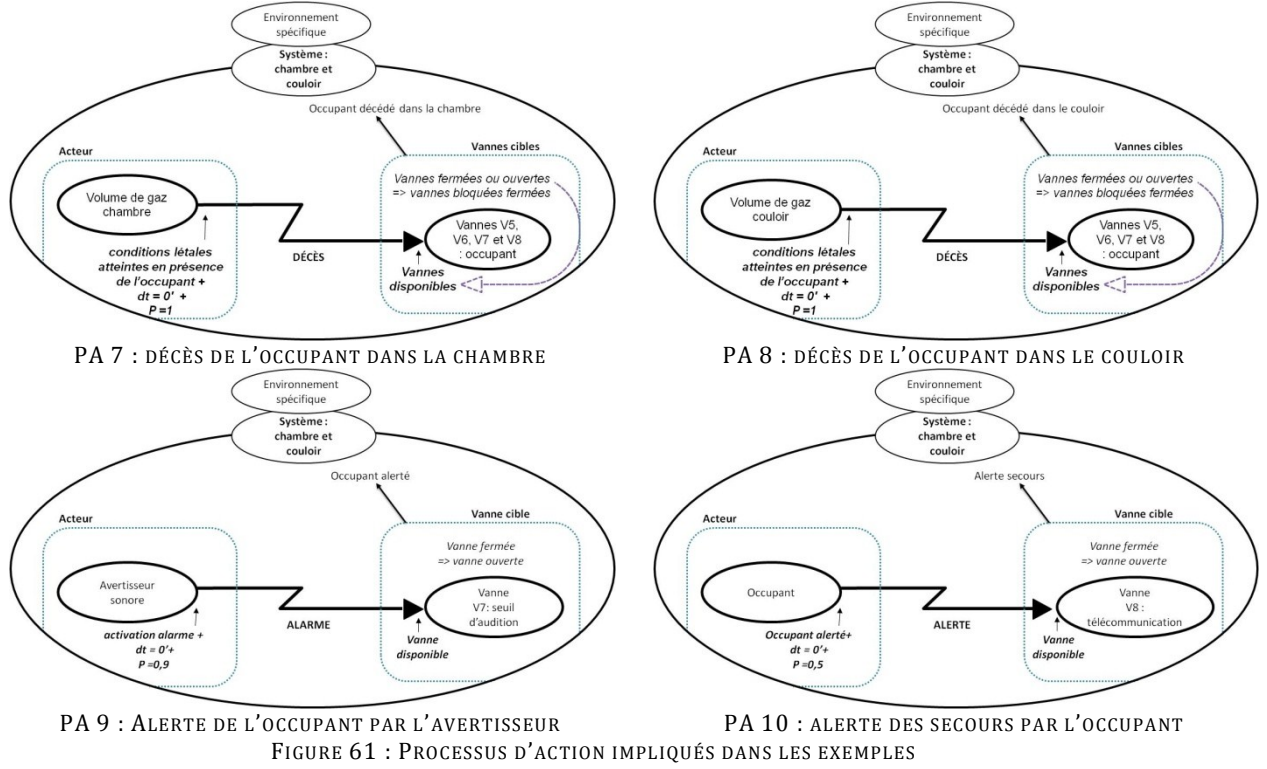


FIGURE 61 : PROCESSUS D'ACTION IMPLIQUÉS DANS LES EXEMPLES

Remarque :

Dans cet exemple de trame, l'occupant ouvre une porte pour sortir de la chambre (cf. PA n°1 et n°5), mais n'en n'ouvre aucune pour sortir du couloir (cf. PA n°6). Les mouvements de la porte du couloir sont donc négligés dans cet exemple.

II.B Réseau de Petri élémentaire représentant le ferme-porte

Le RDPE représentant le ferme-porte est celui de la Figure 62. Puisque ce réseau est composé de **deux places** $P_{1,1}$ et $P_{2,1}$, il contient également **deux fonctions continues** ($F_{1,1}$ et $F_{2,1}$). Par ailleurs, puisque ce réseau est également composé de **deux transitions** $T_{1,1}$ et $T_{2,1}$, il contient également **deux conditions de sensibilisation** ($e_{1,1}$ et $e_{1,2}$) et **deux fonctions de jonction** ($j_{1,1}$ et $j_{1,2}$). Ensuite, puisque ce réseau contient **une transition active** $T_{2,1}$, ce réseau contient **une information pour fusion**. Ici, cette information indique que la transition active $T_{2,1}$ est amenée à fusionner avec la transition passive $T_{5,3}$ du réseau représentant la porte (cf. Figure 64). Enfin, comme tous les réseaux de Petri élémentaires, il contient des **variables**, réparties selon les **cinq types** suivants :

- constante interne (cf. $X_{ci,1}$) ;
- variable interne (cf. $X_{vi,1}$) ;
- constante publique (cf. $X_{cp,1}$) ;
- variable publique (cf. $X_{vp,1}$) ;
- variable image (cf. $X_{im,1}$).

Remarque :

Les points de suspension signifient que l'annotation concernée n'existe pas dans le réseau.

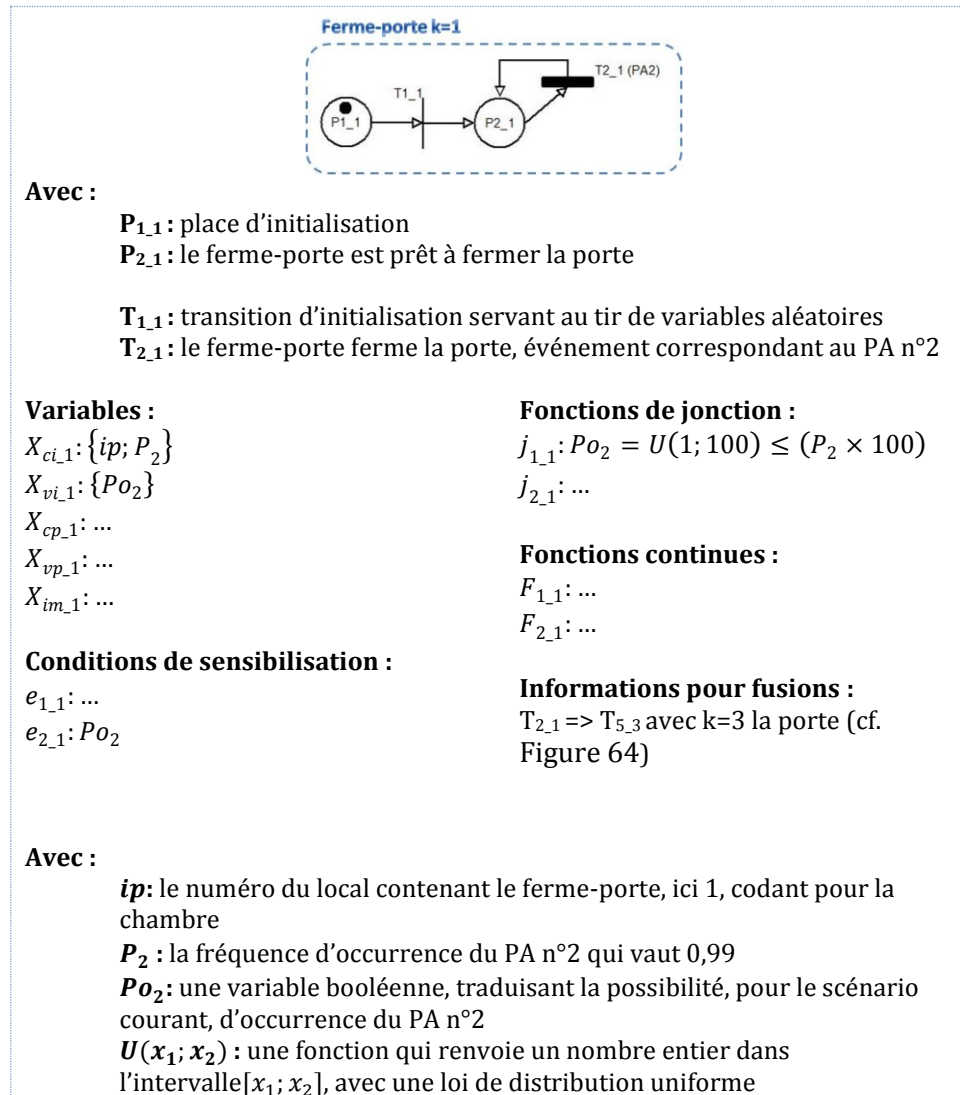


FIGURE 62 : RDPE REPRÉSENTANT LE FERME-PORTE

Au début d'un scénario, la place $P_{1,1}$ est marquée. Puisque la transition $T_{1,1}$ n'a pas de condition de sensibilisation, elle est tirée à l'instant initial (t_0). Lors de ce tir, la valeur de la variable Po_2 est tirée aléatoirement. Cette variable booléenne est vraie si le ferme-porte fonctionne dans ce scénario et fausse s'il ne fonctionne pas. L'événement « le ferme-porte referme la porte » est représenté par le processus d'action n°2 (cf. Figure 61). Puisque la fréquence d'occurrence de ce processus vaut 0,99, la variable Po_2 est vraie dans 99% des scénarios. Dans ce cas, la transition $T_{2,1}$ est sensibilisée. Cette transition est une transition active (elle est noire), ce qui signifie qu'elle doit être tirée de manière concomitante avec une autre transition d'un autre RDPE. La transition en question est alors une transition passive, représentée en blanc. Dans le cas du ferme-porte, la transition passive représentant la fermeture de la porte est la transition $T_{5,3}$ du réseau représentant la porte (cf. le réseau représentant la porte sur la Figure 64). Tant que la transition $T_{5,3}$ n'est pas également sensibilisée, ni le tir de $T_{2,1}$ ni celui de $T_{5,3}$ ne peut avoir lieu. Autrement dit, le ferme-porte ferme la porte lorsqu'elle est ouverte. Suite à cet événement, le ferme-porte est à nouveau disponible pour cette action puisque la transition $T_{2,1}$ est toujours sensibilisée. Il faudra cependant attendre que la porte soit à nouveau ouverte (et que $T_{5,3}$ soit donc à nouveau sensibilisée) pour que l'action se répète.

II.C Réseau de Petri élémentaire représentant l'occupant

Le RDPE représentant l'occupant est celui de la Figure 63. Il est composé de dix places, et donc également de dix fonctions continues. De plus, il contient sept transitions auxquelles sont associées sept conditions de sensibilisation et sept fonctions de jonctions. Parmi ces sept transitions, deux sont actives, c'est pourquoi le réseau contient deux informations pour fusions. Enfin, ce réseau contient des variables, réparties selon les cinq types prédéfinis.

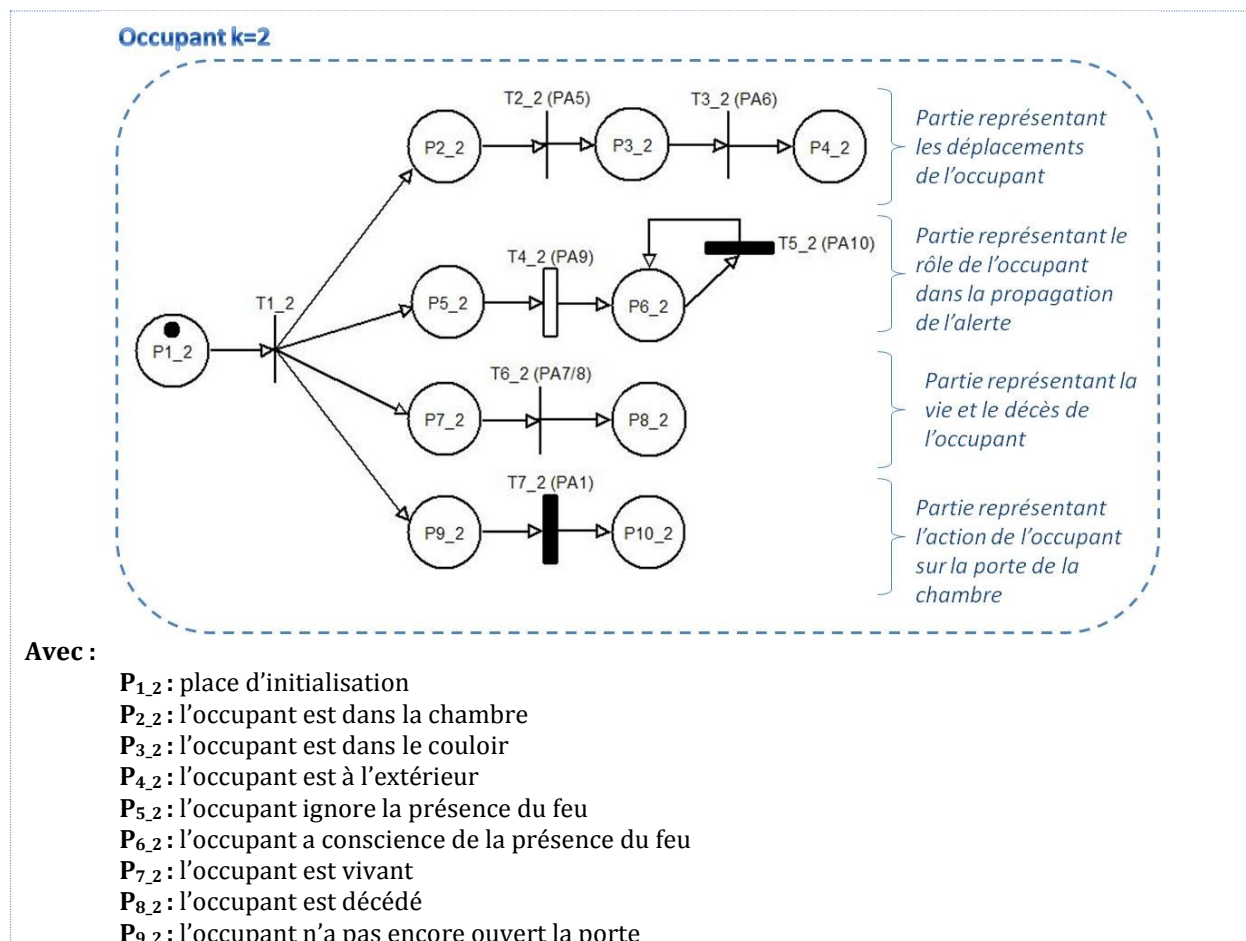
Au début d'un scénario, la place $P_{1,2}$ est marquée et le réseau n'est pas encore initialisé. Le tir de $T_{1,2}$ permet de fixer, pour ce scénario courant, la valeur des variables suivantes :

- Po_{10} : une variable booléenne qui est vraie si dans le scénario courant, l'occupant alerte les secours lorsqu'il en a l'occasion (cf. PA n°10). Cette variable est vraie dans 50% des scénarios, comme l'indique P_{10} , la fréquence d'occurrence du PA n°10 ;
- Δt_5 : le temps que l'occupant va mettre pour sortir de la chambre après avoir été alerté dans le scénario courant. Conformément au délai défini dans le PA n°5, ce temps est fixé entre 15 et 180 secondes.

A ce stade, le réseau est initialisé. Le marquage après cette étape d'initialisation indique qu'initialement, l'occupant :

- est dans la chambre ($P_{2,2}$ est marquée) ;
- ignore la présence du feu ($P_{5,2}$ est marquée) ;
- est vivant ($P_{7,2}$ est marquée) ;
- n'a pas encore ouvert la porte de la chambre ($P_{9,2}$ est marquée).

La suite des commentaires du réseau sont fournis après la Figure 63.



P_{10,2} : l'occupant a déjà ouvert la porte

T_{1,2} : transition d'initialisation servant au tir de variables aléatoires

T_{2,2} : l'occupant sort de la chambre et entre dans le couloir (PA n°5)

T_{3,2} : l'occupant sort du couloir et parvient à l'extérieur (PA n°6)

T_{4,2} : alerte de l'occupant (ici par l'alarme) (PA n°9)

T_{5,2} : l'occupant appelle les secours (PA n°10)

T_{6,2} : l'occupant décède dans la chambre (PA n°7) ou dans le couloir (PA n°8)

T_{7,2} : l'occupant ouvre la porte (PA n°1)

Variables :

$X_{ci,2} : \{\Delta t_6; P_{10}\}$

$X_{vi,2} : \{ip; t_9; t_5; \Delta t_5; Po_{10}; R_5; R_9; blo_1\}$

$X_{cp,2} : \dots$

$X_{vp,2} : \dots$

$X_{im,2} : \{t; T_{zh}\}$

Conditions de sensibilisation :

$e_{1,2} : \dots$

$e_{2,2} : R_9 \wedge (t \geq (t_9 + \Delta t_5)) \wedge \overline{blo_1}$

$e_{3,2} : (t \geq (t_5 + \Delta t_6)) \wedge \overline{blo_1}$

$e_{4,2} : \overline{blo_1}$

$e_{5,2} : Po_{10} \wedge \overline{blo_1}$

$e_{6,2} : T_{zh}^{ip} \geq 100 \wedge \overline{blo_1}$

$e_{7,2} : R_5 \wedge \overline{blo_1}$

Fonctions de jonction :

$j_{1,2} : \left\{ \begin{array}{l} Po_{10} = U(1; 100) \leq (P_{10} \times 100); \\ \Delta t_5 = U(15; 180) \end{array} \right\}$

$j_{2,2} : R_5; t_5 = t; ip = 2$

$j_{3,2} : ip = 3$

$j_{4,2} : R_9; t_9 = t$

$j_{5,2} : \dots$

$j_{6,2} : blo_1$

$j_{7,2} : \dots$

Informations pour fusions :

$T_{5,2} \Rightarrow T_{2,4}$, avec $k=4$ l'indice de l'objet

« secours extérieurs »

$T_{7,2} \Rightarrow T_{4,3}$

Fonctions continues :

$F_{1,2} : \dots$

$F_{2,2} : \dots$

$F_{3,2} : \dots$

$F_{4,2} : \dots$

$F_{5,2} : \dots$

$F_{6,2} : \dots$

$F_{7,2} : \dots$

$F_{8,2} : \dots$

$F_{9,2} : \dots$

$F_{10,2} : \dots$

Avec :

ip : le numéro du local contenant l'occupant, vaut 1 (chambre) au début d'un scénario

$\Delta t_5; \Delta t_6$: les délais de temporisation entre événement initiateur et occurrence des PA n°5, n°6 et n°10, valent respectivement ∞ (pas encore fixé) et 60 secondes au début d'un scénario

P_{10} : la fréquence d'occurrence du PA n°10, qui vaut 0,50

Po_{210} : une variable booléenne, traduisant la possibilité, pour le scénario courant, d'occurrence du PA n°10

$R_5; R_9$: une variable booléenne, traduisant l'occurrence des PA n°5 et n°9, vaut $\overline{R_5}$ et $\overline{R_9}$ (« faux ») au début d'un scénario puisque ces événements ne sont pas encore réalisés

t_9 : l'instant d'occurrence du PA n°9, vaut ∞ au début d'un scénario

blo_1 : une variable booléenne, traduisant le fait que l'occupant soit décédé, vaut $\overline{blo_1}$ (« faux ») au début d'un scénario

T_{zh} : les températures de zone haute dans tous les locaux du bâtiment

$U(x_1; x_2)$: une fonction qui renvoie un nombre entier dans l'intervalle $[x_1; x_2]$, avec une loi de distribution uniforme

FIGURE 63 : RDPE REPRÉSENTANT L'OCCUPANT

Admettons que l'alarme sonne. Dans ce cas, l'occupant (s'il est encore vivant), prend conscience de sa situation de danger. C'est le tir de $T_{4,2}$. Suite à ce tir, deux modifications ont lieu dans le RDPE.

D'une part, le marquage évolue. La place d'entrée de $T_{5,2}$ devient marquée. Cette transition représente l'alerte des secours. Si la condition de sensibilisation de $T_{5,2}$ est validée, alors cette transition est sensibilisée et tirée. En regardant cette condition de sensibilisation $e_{5,2}$, il est possible de déduire que si, pour le scénario courant, l'occupant décide d'alerter les secours (c'est-à-dire que la variable Po_{10} est vraie) et qu'il est encore vivant (c'est-à-dire que la variable blo_1 est fausse, ce qui est noté $\overline{blo_1}$ et indique que la transition $T_{6,2}$ n'a pas encore été tirée), alors il alerte les secours (c'est-à-dire que $T_{5,2}$ est tirée).

D'autre part, lors de ce tir, la variable R_9 devient vraie et l'instant du tir est mémorisé dans la variable t_9 (cf. $j_{4,2}$). Ces variables sont par ailleurs utilisées pour assurer l'enchaînement correctement temporisé entre l'événement « l'occupant entend l'alarme » (représenté par le PA n°9 et par la transition $T_{4,2}$), et l'événement « l'occupant sort de sa chambre » (représenté par le PA n°5 et par la transition $T_{2,2}$). En effet, ces variables se retrouvent dans $e_{2,2}$ la condition de sensibilisation de la transition $T_{2,2}$. Cette condition signifie que si l'occupant est alerté (c'est-à-dire si R_5 est vrai), il va sortir de la chambre en Δt_5 secondes après l'alerte (c'est-à-dire après l'instant t_5), à condition bien sûr que l'occupant soit toujours en vie (c'est-à-dire si la variable blo_1 est fausse).

Admettons maintenant que l'occupant sorte de la chambre : c'est le tir de $T_{2,2}$, correspondant également au PA n°5. Lors de ce tir, la variable T_5 devient vraie et l'instant du tir est mémorisé dans la variable t_5 (cf. $j_{2,2}$). Ces variables sont utilisées pour réaliser l'enchaînement entre la sortie de la chambre (c'est-à-dire le PA n°5 et la $T_{2,2}$) et les événements suivants :

- l'ouverture de la porte par l'occupant, représentée par le PA n°1 et par la transition $T_{7,2}$;
- la sortie du couloir, représentée par le PA et n°6 et la transition $T_{3,2}$.

En effet, d'une part, l'occupant, lorsqu'il sort, ouvre la porte si celle-ci est fermée (c'est le tir de $T_{7,2}$). Ces deux événements surviennent en même temps puisqu'il n'y a pas de temporisation dans $e_{7,2}$. D'autre part, l'occupant sort du couloir Δt_6 secondes après y être entré (c'est-à-dire après l'instant t_5). En effet, une condition de temporisation, notée $(t \geq (t_5 + \Delta t_6))$ est intégrée à la condition de sensibilisation $e_{3,2}$.

Admettons maintenant que l'occupant décède : c'est le tir de $T_{6,2}$, qui survient si la température de la zone haute du local où il se trouve dépasse 100°C (cf. : $e_{6,2}$). Cette transition représente à la fois le processus d'action n°7 (décès dans la chambre) et le processus d'action n°8 (décès dans le couloir). La raison pour laquelle cette unique transition représente deux processus d'action est fournie au paragraphe III.E. Par ailleurs, lors du tir de $T_{6,2}$, la variable blo_1 devient vraie (cf. $j_{6,2}$). Cette variable est utilisée pour représenter les empêchements entre les processus d'action. En effet, on peut observer que cette variable est utilisée dans les conditions de sensibilisation de toutes les transitions, sauf celle servant à initialiser les variables. Cela signifie que, si l'occupant décède, il n'est plus capable de réaliser aucune action puisque toutes les transitions (sauf $T_{1,1}$) sont inhibées.

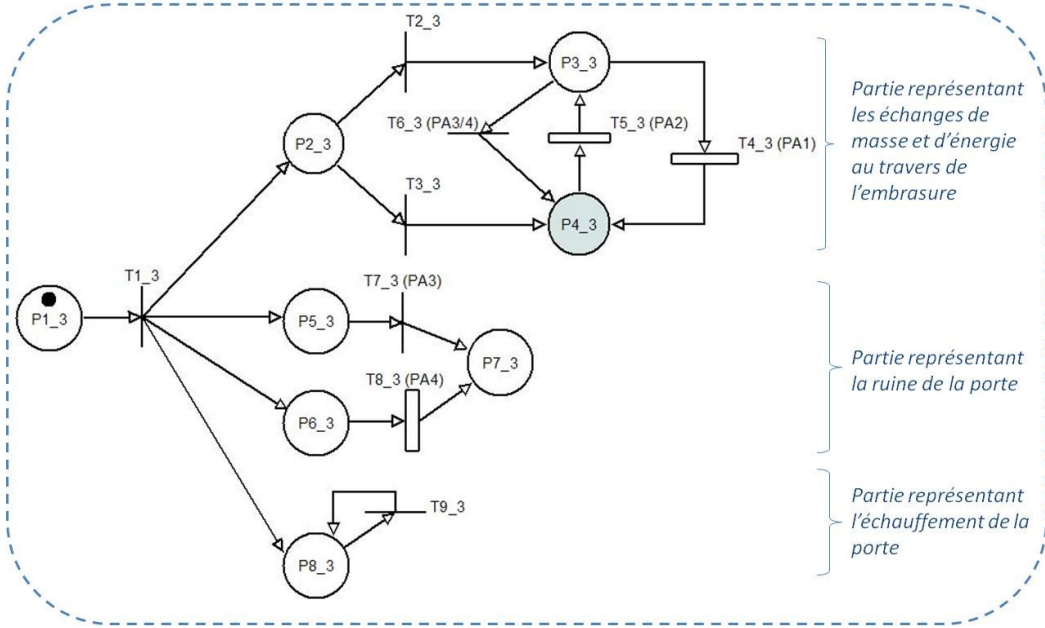
II.D Réseau de Petri élémentaire représentant la porte

Le RDPE représentant la porte est celui de la Figure 64. Il est composé de huit places, auxquelles correspondent huit fonctions continues. De plus, il est composé de neuf transitions auxquelles sont associées neuf conditions de sensibilisation et neuf fonctions de jonctions. Enfin, ce réseau contient des variables, réparties selon les cinq types prédéfinis.

Au début d'un scénario, la place $P_{1,3}$ est marquée, puis la transition $T_{1,3}$ est tirée. Lors de ce tir, la variable aléatoire E_0 prend une valeur pour le scénario courant (cf. $j_{1,3}$). Cette variable E_0 permet de faire varier l'état initial d'ouverture de la porte. En effet, si cette variable vaut 1, la transition $T_{2,3}$ est sensibilisée. Suite à son tir, la place $P_{3,3}$ est marquée, ce qui signifie que pour ce scénario, la porte est initialement fermée. A l'inverse, si cette variable E_0 vaut 2, alors c'est $T_{3,3}$ qui est sensibilisée et tirée. Un jeton marque alors la place $P_{4,3}$, indiquant que la porte est initialement ouverte. Par ailleurs, les deux états d'ouverture sont équiprobables (cf. $j_{1,1}$).

Ces trois transitions $T_{1,1}$, $T_{2,3}$ et $T_{3,3}$ servent donc à initialiser le réseau pour le scénario courant. $T_{1,3}$ est consacrée au tir des variables aléatoires tandis que $T_{2,3}$ et $T_{3,3}$ servent à l'initialisation de l'état initial de l'objet. La suite des commentaires est fournie après la figure.

Porte k=3



Avec :

- P_{1,3}** : place d'initialisation
- P_{2,3}** : place servant à initialiser l'état d'ouverture de la porte
- P_{3,3}** : la porte est fermée – aucun flux de masse ou d'énergie ne traversent l'embrasure
- P_{4,3}** : la porte est ouverte – calcul des flux de masse et d'énergie traversant l'embrasure
- P_{5,3}** : la porte est intacte
- P_{6,3}** : la porte est intacte
- P_{7,3}** : la porte est ruinée
- P_{8,3}** : le ventail reçoit un flux énergétique en provenance du gaz avoisinant, il est agressé

- T_{1,3}** : transition d'initialisation servant au tir de variables aléatoires
- T_{2,3}** : transition d'initialisation de l'état de la porte - la porte est initialement fermée
- T_{3,3}** : transition d'initialisation de l'état de la porte - la porte est initialement ouverte
- T_{4,3}** : ouverture de la porte (ici par l'occupant)
- T_{5,3}** : fermeture de la porte (ici par le ferme-porte)
- T_{6,3}** : ouverture de la porte suite à sa ruine
- T_{7,3}** : ruine thermique de la porte
- T_{8,3}** : ruine de la porte par un autre objet (ici les secours)
- T_{9,3}** : calcul de l'énergie totale accumulée dans le ventail depuis le début du scénario

Variables :

- $X_{ci,3} : \{H; W\}$
- $X_{vi,3} : \{E_0; e_p; e_{p,s}; t_{maj}; blo_1\}$
- $X_{cp,3} : \{ip_1; ip_2\}$
- $X_{vp,3} : \dots$
- $X_{im,3} : \{T_{zh}; T_{zb}; \Delta P; Yo_{2,zh}; Yo_{2,zb}; Y_{f,zh}; Y_{f,zb}; Z\}$

Conditions de sensibilisation :

- $e_{1,3} : \dots$
- $e_{2,3} : E_0 = 1$
- $e_{3,3} : E_0 = 2$
- $e_{4,3} : \overline{blo_1}$
- $e_{5,3} : \overline{blo_1}$
- $e_{6,3} : blo_1$
- $e_{7,3} : e_p \geq e_{p,s} \wedge \overline{blo_1}$
- $e_{8,3} : \overline{blo_1}$

Fonctions de jonction :

- $j_{1,3} : E_0 = U(1; 2)$
- $j_{2,3} : \dots$
- $j_{3,3} : \dots$
- $j_{4,3} : \dots$
- $j_{5,3} : \dots$
- $j_{6,3} : \dots$
- $j_{7,3} : blo_1$
- $j_{8,3} : blo_1$
- $j_{9,3} : e_p = R(T_{zh}; T_{zb}; Z_d; H); t_{maj} = t$

Informations pour fusions :

...

$$e_{9,3}: t \geq t_{maj} + 1$$

Fonctions continues :

$F_{1,3}: \dots$

$F_{2,3}: \dots$

$F_{3,3}: \dots$

$$F_{4,3}: O \left(\begin{array}{l} T_{zh}^{ip_1}, T_{zh}^{ip_2}, T_{zb}^{ip_1}, T_{zb}^{ip_2}, \Delta P^{ip_1}, \Delta P^{ip_2}, Y_{o_2,zh}^{ip_1}, Y_{o_2,zh}^{ip_2}, \\ Y_{o_2,zb}^{ip_1}, Y_{o_2,zb}^{ip_2}, Y_{f,zh}^{ip_1}, Y_{f,zh}^{ip_2}, Y_{f,zb}^{ip_1}, Y_{f,zb}^{ip_2}, Z^{ip_1}, Z^{ip_2}, H, W \end{array} \right)$$

$F_{5,3}: \dots$

$F_{6,3}: \dots$

$F_{7,3}: \dots$

$F_{8,3}: \dots$

Avec :

H; W : les dimensions de la porte, c'est-à-dire respectivement sa hauteur et sa largeur

E_0 : l'état initial d'ouverture de la porte, vaut 1 pour fermée et 2 pour ouverte

$e_p; e_{p,s}$: respectivement l'énergie accumulée dans la porte et l'énergie maximale supportée

t_{maj} : une variable servant à tirer $T_{9,3}$ toutes les secondes

$ip_1; ip_2$: les locaux mis en communication par la porte, respectivement 1 (chambre) et 2 (couloir)

$T_{zh}; T_{zb}$: les températures des zones haute et basse dans tous les locaux du bâtiment (ici la chambre et le couloir)

$Y_{o_2,zh}; Y_{o_2,zb}; Y_{f,zh}; Y_{f,zb}$: les fractions massiques de dioxygène et de fuel des zones hautes et basses dans tous les locaux du bâtiment

Z : la hauteur d'interface thermique dans tous les locaux du bâtiment

ΔP : le différentiel de pression entre le local et une pression de référence dans tous les locaux du bâtiment

$R(\dots)$: une routine CIFI 2009 calculant l'énergie accumulée dans la porte

$O(\dots)$: une routine CIFI 2009 calculant les échanges de masse et d'énergie au niveau de cette porte

$U(x_1; x_2)$: une fonction qui renvoie un nombre entier dans l'intervalle $[x_1; x_2]$, avec une loi de distribution uniforme

FIGURE 64 : RDPE REPRÉSENTANT LA PORTE

Admettons que l'état initial soit le suivant :

- la porte est ouverte ($P_{4,3}$ est marquée) ;
- la porte est intacte ($P_{5,3}$ et $P_{6,3}$ sont marquées) ;
- la porte reçoit de l'énergie de la part du gaz avoisinant et s'échauffe ($P_{8,3}$ est marquée).

Si le ferme-porte ne fonctionne pas pour le scénario courant (cf. § II.B), alors la porte reste ouverte et la place $P_{4,3}$ est marquée. La fonction continue $F_{4,3}$ est exécutée, ce qui a pour effet de calculer les flux massiques et énergétiques au travers de la porte. Ce calcul est réalisé par l'appel d'une routine de CIFI 2009, appelée ici O (comme Ouverture). Cette routine nécessite des paramètres d'entrée fournissant à la fois les caractéristiques du gaz de part et d'autre de la porte (p. ex. : la température des zones hautes $T_{zh}^{ip_1}$ et $T_{zh}^{ip_2}$) et des caractéristiques de la porte (p. ex. : ses dimensions H et W).

A l'inverse, si le ferme-porte fonctionne pour le scénario courant, il referme la porte : c'est le tir de $T_{5,3}$ (cf. PA n°2). Par ailleurs, cette fermeture ne peut avoir lieu que si la porte est intacte, c'est-à-dire si la variable booléenne blo_1 est fausse (cf. $e_{5,3}$). La porte, toujours tant qu'elle est intacte, peut ensuite être ouverte au cours du scénario (ici par l'occupant), ce qui correspond au tir de $T_{4,3}$ (cf. PA n°1). Dans ce cas, le ferme-porte referme à nouveau la porte (tir de $T_{5,3}$).

En parallèle, à chaque seconde, la transition $T_{9,3}$ est tirée (cf. $e_{9,3}$). Cette transition sert à calculer l'énergie absorbée dans la porte. Ce calcul est réalisé dans la fonction de jonction $j_{9,3}$ par l'appel d'une routine de CIFI 2009, appelée R (comme Ruine) dans la Figure 64. Par conséquent, la valeur de la variable e_p augmente au cours du temps. Si cette variable dépasse $e_{p,s}$, le seuil de ruine, alors la porte est détruite : c'est le tir de $T_{7,3}$, qui correspond également au PA n°3. Lors de ce tir, la valeur booléenne blo_1 devient vraie (cf. $j_{7,3}$) et les transitions $T_{4,3}$ et $T_{5,3}$ sont inhibées (cf. $e_{4,3}$ et $e_{5,3}$ qui imposent que la variable blo_1 doit être fausse). Cela signifie que ni l'occupant, ni le ferme-porte ne peuvent plus manipuler la porte si elle est ruinée.

Par ailleurs, la porte peut également être détruite par un autre objet du système (ici par les secours extérieurs lors de leur intervention), ce qui correspond au tir de $T_{8,3}$ et au PA n°4. Dans ce cas également, la variable blo_1 devient vraie et les transitions $T_{4,3}$ et $T_{5,3}$ sont inhibées.

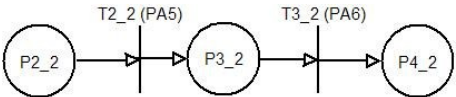
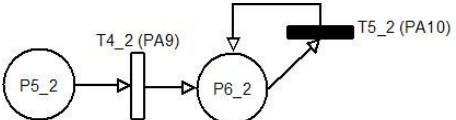
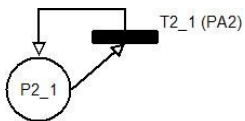
Enfin, en considérant que la porte détruite laisse l'ouverture béante, il est nécessaire de ramener le jeton dans la place $P_{4,3}$ afin de calculer les flux massiques et énergétiques à travers cet ouvrant. Cette évolution du marquage doit avoir lieu quelle que soit l'origine de la ruine. C'est le rôle de la transition $T_{6,3}$, qui est sensibilisée lorsque la porte fermée subit la ruine (c'est-à-dire que $P_{3,3}$ est marquée et que la variable blo_1 devient vraie – cf. $e_{6,3}$).

II.E Enseignements de ces trois exemples

Les exemples présentés ci-avant permettent de tirer quatre enseignements.

Premièrement, tout RDPE k contient au moins une **transition d'initialisation** $T_{1,k}$ dont le rôle est de tirer, pour le scénario courant, la **valeur des variables aléatoires**. De plus, certains RDPE contiennent également des transitions servant à **l'initialisation de l'état de l'objet** (p. ex. : les transitions $T_{2,3}$ et $T_{3,3}$ de la Figure 64).

Deuxièmement, un RDPE est lui-même composé de **plusieurs parties évoluant en parallèle** après le tir de la transition d'initialisation $T_{1,k}$. Chacune de ces parties représente un type de fonction remplie par l'objet. Le tableau suivant présente de manière synthétique les différents types de parties de réseaux pouvant apparaître lors de la construction d'une RDPE. Pour chaque cas, le lien avec les exemples précédent est fait, à la fois en indiquant l'exemple concerné et en proposant une image de la partie de réseau impliquée. Cette illustration permet de prendre conscience des différences de typologie de parties de réseaux obtenues.

Parties de réseau à créer	Exemple précédent concerné	Aspect structurel des parties de réseau obtenues
Déplacement de l'objet	L'occupant	
Rôle de l'objet dans la propagation de l'alerte	L'occupant	
Action de l'objet sur les autres objets	Le ferme-porte	

Parties de réseau à créer	Exemple précédent concerné	Aspect structurel des parties de réseau obtenues
	L'occupant	
Interactions continues de l'objet avec le modèle aéralique	La porte (échanges de masse et d'énergie à travers l'embrasure)	
	La porte (solicitation thermique et échauffement du ventail)	
Dégradation de l'objet	L'occupant	
	La porte	

TABLEAU 8 : DIFFÉRENTES PARTIES POUVANT APPARAÎTRE LORS DE LA CONSTRUCTION DES RÉSEAUX

Troisièmement, il est possible de faire d'ores et déjà un **parallèle entre les réseaux de Petri et le modèle systémique**. D'une part, **certaines parties** de RDPE correspondent **aux vues** du modèle systémique. En effet :

- la partie représentant le déplacement de l'objet correspond à la vue mouvement de personne ;
- la partie représentant le rôle de l'objet dans la propagation de l'alerte correspond à la vue information ;
- et les parties représentant les interactions de l'objet avec le modèle aéraulique correspondent à la vue physique.

D'autre part, **la plupart des transitions représentent des processus d'action**. Le plus souvent, dans un même RDPE, il y a une transition pour un processus d'action, mais ce cas n'est pas généralisable. De même, il apparaît qu'une unique transition peut représenter plusieurs processus d'action. En outre, il apparaît que **les règles de traduction diffèrent plus ou moins légèrement selon la partie de réseau concernée**. Le paragraphe III approfondit le parallèle entre le modèle systémique et les différentes parties de réseau.

Quatrièmement, les différentes parties d'un même RDPE n'évoluent pas de manière totalement indépendante et ceci pour deux raisons. D'une part, certains tirs de transitions ont pour effet de déclencher, avec un éventuel délai de synchronisation, des tirs dans d'autres parties du RDPE. Ce cas correspond le plus souvent à un enchaînement de processus d'action, notion définie au chapitre précédent. D'autre part, les tirs de certaines transitions inhibent des transitions dans

d'autres parties. Ce cas correspond à un empêchement de processus d'action, notion également définie au chapitre précédent. **Les enchaînements et les inhibitions de transitions au sein d'un même RDPE sont principalement assurés par l'intermédiaire de variables**, dont les valeurs, modifiées dans la fonction de jonction de la transition initiatrice (resp. inhibitrice) sont utilisées dans les conditions de sensibilisation de la transition initiée (resp. inhibée).

III. PARALLÈLE ENTRE LE MODÈLE SYSTÉMIQUE ET LES DIFFÉRENTES PARTIES D'UN RÉSEAU DE PETRI ÉLÉMENTAIRE

Le présent paragraphe a pour objectif de pousser un peu plus le parallèle entre le modèle systémique et les parties de réseau de Petri mises en évidence au paragraphe précédent (cf. Tableau 8). Ce paragraphe permet de mieux appréhender quelques correspondances existantes entre les deux langages. Toutefois, il ne saurait être le reflet de la totalité des règles de traduction élaborées durant la présente recherche doctorale et présentées en annexes.

III.A Partie représentant le déplacement de l'objet

La partie de réseau représentant le déplacement de l'objet (1^e ligne du Tableau 8) contient toujours **autant de places que de lieux** dans lequel l'objet peut aller. Les **transitions correspondent alors aux changements de lieux**. Dans le modèle systémique, les lieux sont représentés par des **boîtes** (dans la vue mouvement de personnes) et les changements de lieux par des **processus d'action**. La Figure 65 illustre le parallèle entre le modèle systémique et cette partie de réseau sur l'exemple de l'occupant. Sur cette figure, il apparaît que les boîtes D, E et F ont donné les places $P_{2,2}$, $P_{3,2}$ et $P_{4,2}$ tandis que les processus d'action n°5 et n°6 ont donné les transitions $T_{2,2}$ et $T_{3,2}$.

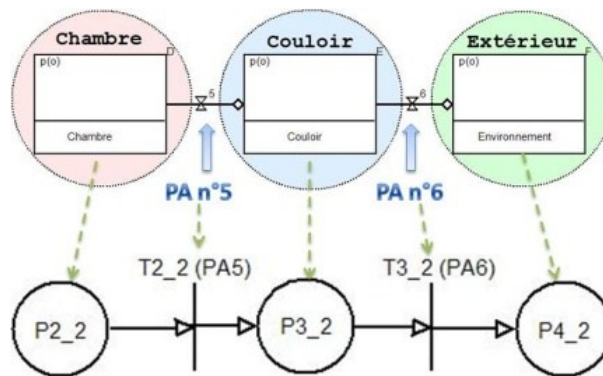


FIGURE 65 : PARALLÈLE ENTRE LE MODÈLE SYSTÉMIQUE ET LA PARTIE DE RÉSEAU REPRÉSENTANT LE DÉPLACEMENT DE L'OBJET

III.B Partie représentant le rôle de l'objet dans la propagation de l'alerte

La partie de réseau représentant le rôle de l'objet dans la propagation de l'alerte (2^e ligne du Tableau 8) contient toujours **deux places** : l'une signifiant que l'objet n'est pas alerté et l'autre qu'il l'est. Les **transitions** permettant de passer d'une place à l'autre correspondent aux **réceptions de l'alerte** (cf. la transition $T_{4,2}$), et les autres transitions aux **transmissions de l'alerte** (cf. la transition $T_{5,2}$). Dans le modèle systémique, l'état d'alerte de l'objet est représenté par une **boîte**. Cette boîte est vide si l'objet ignore le danger (ou qu'il n'est pas encore activé), et pleine lorsqu'il en a conscience (ou qu'il est activé). De plus, les transmissions d'alerte sont représentées par des **processus d'action**. La Figure 66 illustre le parallèle entre le modèle systémique et cette partie de réseau, là aussi sur l'exemple de l'occupant. Sur cette figure, la

boîte H a donné les places $P_{5,2}$ (la boîte est vide – l'occupant n'est pas alerté) et $P_{6,2}$ (la boîte est pleine – l'occupant est alerté) tandis que les processus d'action n°9 (l'occupant entend l'avertisseur sonore) et n°10 (l'occupant alerte les secours) ont donné les transitions $T_{4,2}$ et $T_{5,2}$.

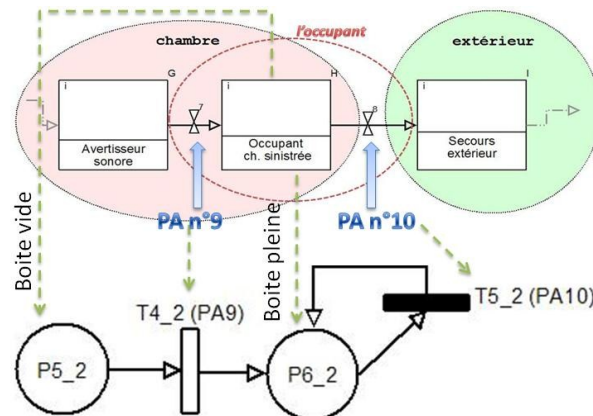


FIGURE 66 : PARALLÈLE ENTRE LE MODÈLE SYSTÉMIQUE ET LA PARTIE DE RÉSEAU REPRÉSENTANT LE RÔLE DE L'OBJET DANS LA PROPAGATION DE L'ALERTE

III.C Partie(s) représentant une action de l'objet sur les autres objets

Une partie représentant une action de l'objet sur les autres objets (3^e ligne du Tableau 8) peut avoir **deux formes** : soit celle de l'exemple du ferme-porte (cf. la place $P_{2,1}$ et la transition $T_{2,1}$), soit celle de l'exemple de l'occupant (cf. les places $P_{9,2}$ et $P_{10,2}$, et la transition $T_{7,2}$). La différence entre ces deux formes est que dans le **premier cas, l'action est répétable** (c'est-à-dire que le ferme-porte peut refermer plusieurs fois la porte dans un même scénario) **tandis qu'elle ne l'est pas dans le second** (c'est-à-dire que l'occupant n'ouvre la porte qu'une seule fois par scénario). Dans tous les cas, la **transition** apparaissant dans cette partie de réseau correspond toujours au **processus d'action représentant l'action** (p. ex. : le PA n°1 représentant la fermeture de la porte par l'occupant a donné naissance à la transition $T_{7,2}$).

III.D Partie(s) représentant les interactions continues de l'objet avec le modèle aéraulique

Les parties représentant les **interactions continues** de l'objet avec le modèle aéraulique (4^e ligne du Tableau 8) obéissent à des **règles très particulières**, assez compliquées à détailler ici (elles le sont en annexes). Ces particularités trouvent leur origine dans la **dynamique hybride de ces parties**. En d'autres termes, elles contiennent des **appels à des routines** CIFI 2009, soit par l'intermédiaire de fonctions continues (cf. les places bleues comme $P_{4,3}$ sur la Figure 67), soit par l'intermédiaire de fonction de jonction (cf. les transitions comme $T_{9,3}$ sur la Figure 67).

La Figure 67 permet tout de même d'avoir une idée de ces règles, illustrées ici pour le cas de la porte.

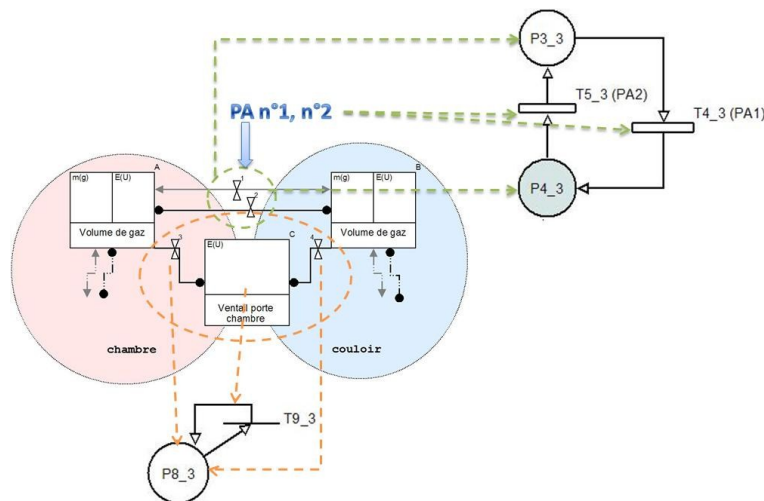


FIGURE 67 : PARALLÈLE ENTRE LE MODÈLE SYSTÉMIQUE ET LA PARTIE DE RÉSEAU REPRÉSENTANT LES INTERACTIONS CONTINUES DE L'OBJET AVEC LE MODÈLE AÉRAULIQUE

D'une part, la partie de réseau représentant les flux de masse et d'énergie au travers de l'embrasure correspond aux vannes V1 et V2 (entourées en vert sur la Figure 67). Ces vannes ont **deux positions**⁵¹ :

- soit elles sont fermées, ce qui a donné naissance à la **place** $P_{3,3}$;
- soit elles sont ouvertes, ce qui a donné naissance à la **place** $P_{4,3}$.

Elles **changent de position** au fil des **processus d'action**, qui les ouvrent ou qui les ferment. Pour cet exemple, le processus d'action n°1 (ouverture de la porte par l'occupant) a donné naissance à la **transition** $T_{4,3}$ et le processus d'action n°2 (fermeture de la porte par le ferme-porte) a donné naissance à la **transition** $T_{5,3}$. Chacune de ces **transitions** fait **évoluer le marquage** de manière à ce qu'il **indique toujours la position des vannes**.

D'autre part, la partie de réseau représentant l'échauffement du ventil correspond aux vannes V3 et V4 et à la boîte C (entourées en orange dans la Figure 67). Ces vannes n'ont qu'**une seule position** tout au long d'un scénario : elles sont ouvertes. Pour cette raison, il n'y a qu'**une seule place** dans le réseau : $P_{8,3}$. La **transition** $T_{9,3}$, quant à elle, sert à **calculer le stockage d'énergie** dans le ventil. Elle représente ici la **boîte C**.

III.E Partie représentant la dégradation de l'objet

A la lecture de la dernière ligne du Tableau 8, il apparaît que la **structure** de cette partie **peut différer**. En effet, la partie représentant le décès de l'occupant (cf. les places $P_{7,2}$ et $P_{8,2}$, ainsi que la transition $T_{6,2}$) n'est pas identique à celle représentant la ruine de la porte (cf. les places $P_{5,3}$, $P_{6,3}$ et $P_{7,2}$ ainsi que les transitions $T_{7,3}$ et $T_{8,3}$). Ces différences s'expliquent par **l'application de différentes stratégies de suppression des conflits dans les réseaux** (stratégies qui sont présentées en annexes). Il est possible de déduire qu'une telle partie de réseau contient toujours :

- **une ou plusieurs places** signifiant que **l'objet n'est pas dégradé** (p. ex. : les places $P_{7,2}$, $P_{5,3}$ et $P_{6,3}$) ;
- **une place** signifiant que **l'objet est dégradé** (p. ex. : les places $P_{8,2}$ et $P_{7,3}$).

⁵¹ Rappel : le nombre de positions (d'ouverture/fermeture) que peut prendre une vanne au cours d'un scénario constitue son degré de liberté.

Si cette dernière place est marquée, alors certaines transitions des parties précédentes sont inhibées, ce qui modélise alors une perte de capacité (cf. les exemples des paragraphes II.C et II.D).

Les **transitions** liant ces deux types de places représentent toujours des **processus d'action inhibiteurs** (tels que les PA n°3, n°4, n°7 et n°8).

La Figure 68 illustre le parallèle entre le modèle systémique et cette partie de réseau sur l'exemple de la porte, qui correspond au cas le plus compliqué des deux. Sur cette figure, il apparaît que les processus d'action inhibiteurs n°3 et n°4 ont eu deux répercussions.

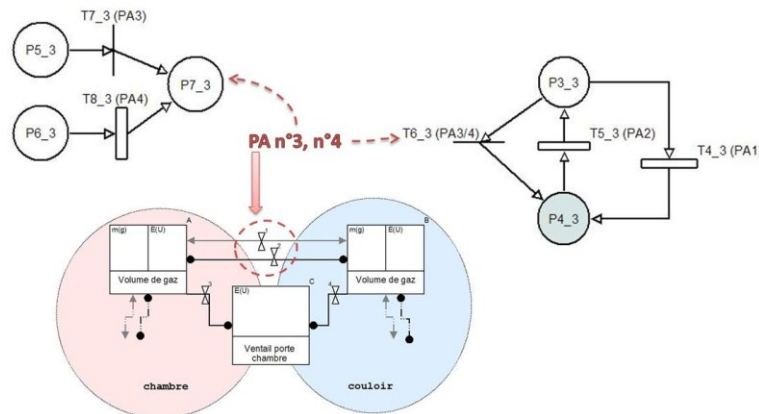


FIGURE 68 : PARALLÈLE ENTRE LE MODÈLE SYSTÉMIQUE ET LA PARTIE DE RÉSEAU REPRÉSENTANT LA DÉGRADATION DE L'OBJET

D'une part, ils ont intégralement engendré **la partie représentant la ruine de la porte** (cf. les places $P_{5,3}$, $P_{6,3}$, $P_{7,3}$ et les transitions $T_{7,3}$ et $T_{8,3}$). Dans cette partie de réseau, le tir de la transition $T_{7,3}$ indique la réalisation du processus d'action PA n°3, tandis que le tir de la transition $T_{8,3}$ indique celle du PA n°4.

D'autre part, ils ont généré une **transition supplémentaire** dans la partie de réseau représentant les flux de masse et d'énergie au travers de l'embrasure. Cette transition sert à **ramener le jeton** dans la place porte ouverte, et ainsi assurer un calcul correct, via la fonction continue $F_{4,3}$, des flux de masse et d'énergie au travers de l'ouverture laissée par la porte ruinée.

IV. PRÉSENTATION DE LA DÉMARCHE DE CONSTRUCTION

IV.A Présentation générale de la démarche de construction

La Figure 69 présente de manière synthétique la démarche de construction des RDPE à partir du modèle systémique. Cette démarche, se déroulant en **plusieurs phases**, permet la **construction successive des différents éléments du réseau**, puis après une **étape de simplification**, leur **assemblage**. Par ailleurs, certaines phases mènent parfois à la construction d'éléments de structure ou d'annotation (places, transitions, fonction de jonction, variables...) en surnombre car les règles de construction sont très générales. Cette généralité était incontournable pour pouvoir s'adapter aux nombreuses configurations possibles. Pour pallier le problème de surnombre, des phases de simplification ont été introduites, comme par exemple la phase D (cf. Figure 69).

D'une manière générale, la démarche est plutôt adaptée à une **construction semi-automatique** des réseaux élémentaires qu'à une construction manuelle. Une personne suffisamment familière

avec la démarche et avec le langage ISI-Systema sera capable de mener plusieurs phases en parallèle.

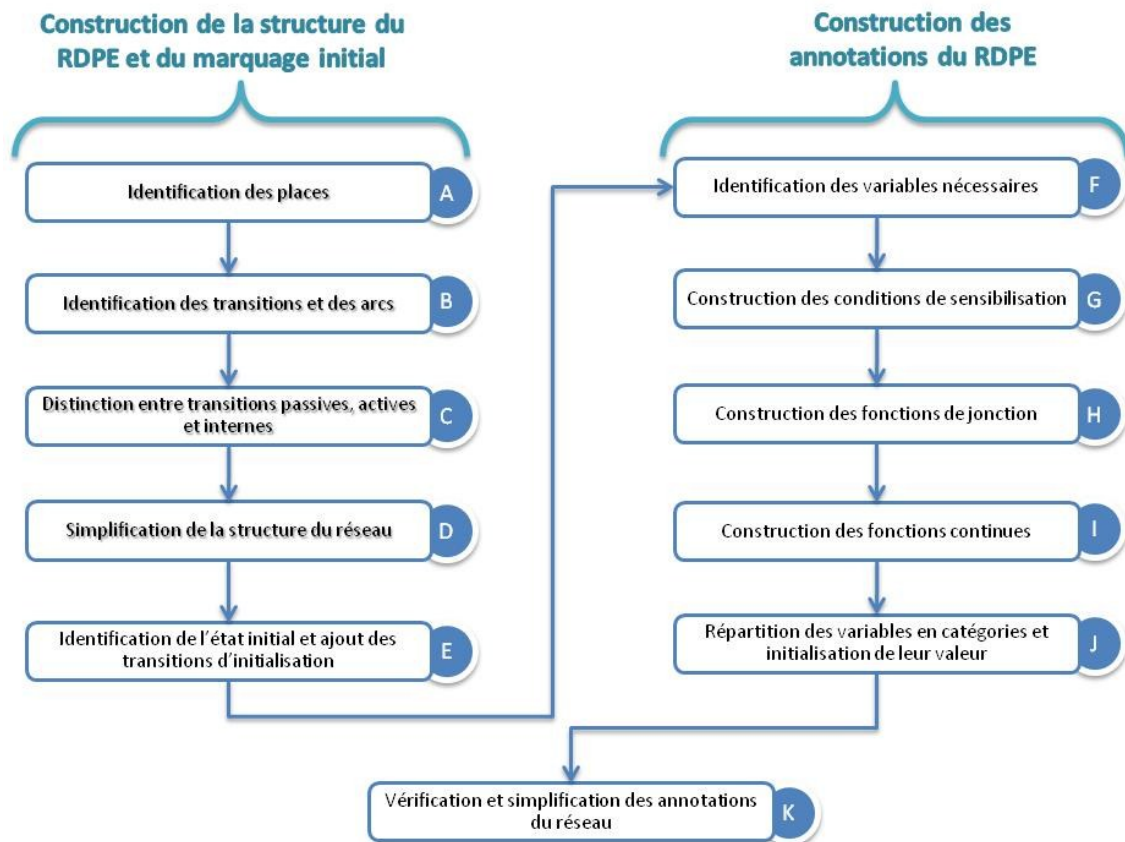


FIGURE 69 : PRÉSENTATION GÉNÉRALE DE LA DÉMARCHE DE CONSTRUCTION DE RÉSEAUX DE PETRI

La construction d'un RDPE se déroule en **trois phases principales** successives : la construction de la structure et du marquage initial dans un premier temps, la construction des annotations dans un second temps et enfin la vérification et l'éventuelle correction du réseau. À l'intérieur de ces phases principales, des **phases secondaires (onze au total, marquées de A à K)** se succèdent.

Pour construire la structure et le marquage initial, il faut d'abord construire, **pour chacune des parties du réseau**, les places nécessaires. Cette tâche correspond à la phase A. Ensuite, il convient de placer les arcs et les transitions dans chacune des parties (cf. phase B) avant de pouvoir distinguer le type des transitions parmi les trois possibilités suivantes : internes, passives et actives (cf. phase C). Suite à ce travail, la structure du réseau est simplifiée (cf. phase D). Durant cette phase, places et transitions inutiles sont supprimées et les doublons sont fusionnés. La structure des parties du RDPE est maintenant construite. Il reste à identifier l'état initial de l'objet et à ajouter les transitions d'initialisation *ad hoc* (cf. phase E). Les différentes parties du RDPE sont maintenant liées. La structure et le marquage du RDPE sont achevés.

Pour construire les annotations du réseau, il faut d'abord lister toutes les variables nécessaires (cf. phase F), puis construire pour chaque transition les conditions de sensibilisation (cf. phase G) et les fonctions de jonction (cf. phase H). Après avoir identifié les routines CIFI 2009 à utiliser, il convient de construire les fonctions continues dans les bonnes places (cf. phase I). La dernière phase (cf. phase J) consiste à répartir les variables parmi les cinq catégories suivantes : les constantes internes, les variables internes, les constantes publiques, les variables publiques et

les variables images. Les définitions de ces catégories sont fournies au paragraphe III.B.d) du premier chapitre. A ce stade, les annotations sont construites.

En dernier lieu, la phase K permet de vérifier le réseau, d'y supprimer d'éventuels conflits et de simplifier les annotations.

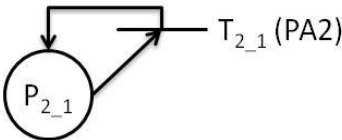
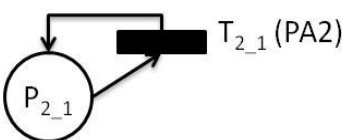
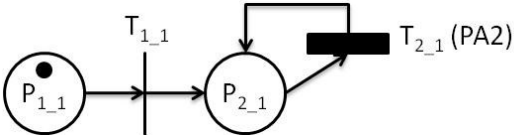
Le paragraphe suivant illustre la démarche de construction sur un exemple très simple : celui du ferme-porte.

IV.B Illustration de la démarche de construction sur l'exemple du ferme-porte

Le réseau de Petri élémentaire représentant le ferme-porte est construit pas à pas dans les paragraphes ci-dessous. Sa construction se déroule en trois temps : la construction de la structure et du marquage, la construction des annotations et enfin, la vérification et la simplification du réseau. Cet exemple est très simple et des cas plus compliqués sont disponibles en annexes.

IV.B.a) Construction de la structure et du marquage

La construction de la structure et du marquage nécessite **cinq phases**, détaillées dans le Tableau 9. Ce tableau est commenté ci-dessous.

Phase principale	Phase secondaire	Aspect du RDPE « ferme-porte »
Structure et marquage	Phase A	
	Phase B	
	Phase C	
	Phase D	Sans objet sur cet exemple
	Phase E	

TABEAU 9 : LES CINQ PHASES DE CONSTRUCTION DE LA STRUCTURE DU RÉSEAU REPRÉSENTANT LE FERME-PORTE

Tout d'abord, la **construction des places** débute (phase A). Pour le ferme-porte, il n'y a **qu'une seule place** : P_{2_1} . Le marquage de cette place indique que le ferme-porte est prêt à fermer la porte.

Ensuite, il convient d'ajouter **les transitions et les arcs** (phase B). Le ferme-porte ne réalise **qu'une seule action** : **fermer la porte** (cet événement correspond par ailleurs au processus d'action n°2). Il en découle que le réseau ne contient **qu'une seule transition** : T_{2_1} . Le tir de

cette transition symbolise **la fermeture de la porte**, c.à.d. l'occurrence du PA n°2. Puisque cette action se répète à chaque fois que la porte est ouverte, il faut que la place $P_{2,1}$ reste toujours marquée afin que la transition $T_{2,1}$ puisse être tirée de manière périodique. C'est la raison pour laquelle la place $P_{2,1}$ est à la fois place d'entrée et place de sortie de la transition $T_{2,1}$.

Durant la phase suivante (phase C), le **type de chaque transition** doit être défini parmi les possibilités suivantes : transition active, transition passive ou transition interne. Les différences entre ces types sont rappelées ci-dessous.

Rappel :

- une transition interne est une transition qui ne concerne que l'objet étudié ;
- une transition active représente l'action de l'objet étudié sur un tiers (un autre objet) ;
- une transition passive représente l'action d'un tiers sur l'objet étudié.

Concrètement, une transition active et une transition passive destinées à fusionner représentent le même événement mais une fois du côté de l'acteur (c'est l'active) et l'autre fois du côté de la cible (c'est la passive).

Puisque **le ferme-porte agit sur un autre objet** (ici la porte), la **transition** $T_{2,1}$ est **active**. Elle est amenée à **fusionner** avec la transition $T_{5,3}$ du RDPE représentant la porte.

Ensuite, l'avant dernière phase (phase D) est une phase de **simplification** dont l'objectif est d'éliminer d'éventuelles transitions en double et places inutiles. En ce qui concerne le ferme-porte, la structure, déjà très simple, ne nécessite **aucune simplification**.

Enfin, la dernière phase (phase E) est la phase d'**initialisation**. Le but de cette phase est d'ajouter les places et les transitions nécessaires pour :

- relier toutes les parties du réseau ;
- permettre une initialisation aléatoire de l'état de l'objet.

Le ferme-porte a toujours le **même état initial** : il est accroché à la porte et prêt à la refermer si quelqu'un l'ouvre. De plus, le réseau ne contient **qu'une seule partie** : celle représentant l'action du ferme-porte sur la porte. Dans ce cas, **l'initialisation est relativement simple** et consiste à **ajouter une place $P_{1,1}$ et une transition $T_{1,1}$** , dont la place de sortie est $P_{2,1}$. Un **jeton** est enfin ajouté dans la place $P_{1,1}$. **La structure et le marquage sont achevés.**

IV.B.b) Construction des annotations

La construction de la structure et du marquage nécessite cinq phases, détaillées dans le Tableau 10.

Phase principale	Phase secondaire	Aspect du RDPE « ferme-porte »
Annotations	Phase F	$X_1: \{ip; P_2; Po_2; \Delta t_2; R_2; t_2; R_1(X_{vp,3}); t_1(X_{vp,3})\}$
	Phase G	$e_{1,1}: \dots$ $e_{2,1}: R_1(X_{vp,3}) \wedge Po_2 \wedge [t \geq (t_1(X_{vp,3}) + \Delta t_2)]$
	Phase H	$j_{1,1}: Po_2 = U(1; 100) \leq (P_2 \times 100)$ $j_{2,1}: R_2; t_2 = t$
	Phase I	$F_{1,1}: \dots$ $F_{2,1}: \dots$

Phase principale	Phase secondaire	Aspect du RDPE « ferme-porte »
Annotations	Phase F	$X_1: \{ip; P_2; P_{O2}; \Delta t_2; R_2; t_2; R_1(X_{vp,3}); t_1(X_{vp,3})\}$
	Phase J	$X_{ci,1}: \{ip; P_2; \Delta t_2\}$ $X_{vi,1}: \{P_{O2}; R_2; t_2\}$ $X_{cp,1}: \dots$ $X_{vp,1}: \dots$ $X_{im,1}: \{R_1(X_{vp,3}); t_1(X_{vp,3})\}$

TABLEAU 10 : LES CINQ PHASES DE CONSTRUCTION DES ANNOTATIONS DU RÉSEAU REPRÉSENTANT LE FERME-PORTE

Identification des variables (phase F)

La première étape (phase F) consiste à identifier toutes les **variables** nécessaires. Cette identification est réalisée en associant un nombre défini de variables pour chaque processus élémentaire rempli par l'objet. Dans un souci de simplicité, ce paragraphe n'aborde pas toutes les variables pouvant être introduites. Il n'est donc qu'une première familiarisation avec la procédure.

Avant toute chose, il faut une variable **ip** indiquant le local dans lequel le ferme-porte se trouve. Cette variable ip est systématiquement ajoutée pour chaque objet. Dans cet exemple, ip vaut 1 car le ferme-porte se situe dans la chambre.

Ensuite, par convention, cinq variables sont systématiquement introduites pour chaque processus d'action impliquant l'objet. S'il se révèle au terme de la construction, que certaines d'entre elles sont inutiles, elles sont éliminées lors de la phase K (cf. paragraphe IV.B.c). Cette convention a été posée dans un objectif d'automatisation de la démarche de construction des réseaux. Dans l'exemple du ferme-porte, il faut donc introduire les cinq variables suivantes, associées au processus d'action n°2 « fermeture de la porte par le ferme-porte » :

- **P₂** : la fréquence d'occurrence de la fermeture qui vaut 0,99 ;
- **P_{O2}** : une variable booléenne, traduisant la possibilité d'occurrence de la fermeture pour le scénario courant. Au début du scénario, cette variable n'a pas encore de valeur ;
- **Δt₂** : le délai de synchronisation entre l'ouverture de la porte et sa fermeture par le ferme-porte. Cette variable vaut 0 secondes ;
- **t₂** : l'instant auquel le ferme-porte a refermé la porte dans le scénario courant. Au début du scénario, cette variable vaut ∞ secondes ;
- **R₂** : une variable booléenne vraie (R_2) ou fausse ($\overline{R_2}$) servant mémoriser si le ferme-porte a déjà refermé la porte dans le scénario courant. Au début du scénario, cette variable est fausse et vaut donc $\overline{R_2}$.

En outre, si le processus d'action est un processus d'action inhibiteur, alors une variable booléenne **blo** (servant à mettre en œuvre l'inhibition) est également requise. Ce cas ne s'applique pas au ferme-porte car il ne peut pas être détruit dans notre exemple de trame. Pour cette raison, il n'y a pas de variable blo dans le Tableau 10.

Enfin, il faut chercher pour chacun des processus d'action impliquant l'objet (p. ex. : le processus « fermeture de porte » impliquant l'objet « ferme-porte »), s'il est initié ou inhibé par un autre processus d'action (p. ex. : le processus « ouverture de la porte »). Si c'est le cas, alors des variables sont nécessaires pour traduire l'initiation et/ou l'inhibition. Deux cas se présentent alors.

Soit les processus d'action inhibiteurs et/ou initiateurs impliquent l'objet étudié. Le ferme-porte n'est pas concerné par ce cas mais un exemple concernant l'occupant convient : un événement impliquant l'occupant (l'alerte) initie un autre événement impliquant l'occupant (la sortie de la chambre). Dans ce cas, aucune variable additionnelle n'est nécessaire car toutes les variables requises elles ont déjà été créées.

Soit les processus d'action inhibiteurs et/ou initiateurs n'impliquent pas l'objet étudié. Par exemple, l'événement « ouverture de la porte » implique l'objet « porte » et non l'objet « ferme-porte ». Toutefois, cet événement initie un événement impliquant le ferme-porte. En effet, l'ouverture de la porte initie l'événement « fermeture de la porte par le ferme-porte ». Dans ce cas, les variables nécessaires pour traduire l'initiation (resp. l'inhibition) existent mais elles ont été créées dans un autre objet (p. ex. : dans le RDPE représentant la porte). Un partage de variable doit alors être mis en place et des variables images ajoutées. Par exemple, concernant le ferme-porte, les deux variables images suivantes sont ajoutées :

- $R_1(X_{vp,3})$: une variable image, lue chez l'objet $k=3$ (la porte) et indiquant si la porte est ouverte ;
- $t_1(X_{vp,3})$: une variable image, lue chez l'objet $k=3$ (la porte) et indiquant depuis quand la porte est ouverte.

Ces deux variables sont partagées avec le RDPE représentant la porte. De plus, ces variables sont associées au processus d'action n°1 car le processus d'action n°1 est l'initiateur du processus d'action n°2 (c'est bien parce que la porte est ouverte qu'elle peut être refermée).

Construction des autres annotations (phases G à J)

La seconde étape revient à construire les **conditions de sensibilisation** (phase G). D'une part, puisque la transition $T_{1,1}$ doit être tirée dès le début du scénario, la condition $e_{1,1}$ est **vide**. D'autre part, la transition $T_{2,1}$ représente l'occurrence du processus d'action n°2. La condition de sensibilisation de cette transition n'est rien de plus que **l'expression booléenne des conditions d'initialisation du processus d'action n°2**. Concrètement, le résultat est le suivant :

$$e_{2,1}: \underbrace{R_1(X_{vp,3})}_{\substack{\text{l'événement initiateur} \\ \text{a-t-il eut lieu ?} \\ \text{(ici, la porte est-elle} \\ \text{ouverte c.à.d le PA n°1} \\ \text{est-il réalisé)}}} \wedge \underbrace{Po_2}_{\substack{\text{la probabilité} \\ \text{d'occurrence} \\ \text{est-elle respectée ?} \\ \text{(ici le ferme-porte} \\ \text{n'est pas défaillant)}}} \wedge \underbrace{[t > (t_1(X_{vp,3}) + \Delta t_2)]}_{\substack{\text{le délai depuis} \\ \text{l'événement initiateur} \\ \text{est-il écoulé ?}}}$$

La troisième étape consiste à construire les **fonctions de jonctions** (phase H). D'une part, la fonction de jonction $j_{1,1}$ sert à **tirer les variables aléatoires** du scénario. Dans l'exemple du ferme-porte, seule la variable Po_2 est aléatoire. Elle est donc tirée dans la fonction de jonction $j_{1,1}$ à l'aide d'une fonction génératrice de nombre aléatoire $U(x_1; x_2)$. D'autre part, la fonction de jonction $j_{2,1}$ sert à **enregistrer l'instant et l'occurrence du processus d'action n°2**. C'est pourquoi la variable R_2 devient vraie et la variable t_2 prend la valeur de l'instant du tir de $T_{2,1}$.

La quatrième étape consiste à construire les **fonctions continues** (phase I). Puisque le ferme-porte n'entretient pas d'interaction avec le modèle aérodynamique, ces fonctions sont laissées **vides**.

Enfin, la dernière étape consiste à **répartir les variables selon les cinq types de variables**. Les variables ip , P_2 et Δt_2 gardent leur valeur initiale durant toute la durée d'un scénario. Elles sont donc **constantes**. Les variables Po_2 , R_2 et t_2 sont modifiées durant le scénario (cf. les fonctions de jonctions). Elles sont donc **variables**. Enfin, les variables R_1 et t_1 , indiquant si la porte est

ouverte et depuis quand, **appartiennent à l'objet « porte »**. En conséquent, elles sont **lues chez cet objet « porte »** et n'apparaissent qu'en tant que **variables images** dans le réseau « ferme-porte ». Ces variables images sont notées $R_1(X_{vp,3})$ et $t_1(X_{vp,3})$.

IV.B.c) Vérification et simplification

La vérification consiste à **éliminer les conflits** du réseau de Petri. Le réseau représentant le ferme-porte n'en présente aucun.

Remarque :

La définition d'un conflit est fournie au premier chapitre.

Quant aux simplifications, elles :

- éliminent les **variables inutiles** ;
- simplifient les conditions de sensibilisation ;
- simplifient les conditions de jonction.

Si les réseaux sont codés manuellement, ces simplifications s'avèrent utiles car elles diminuent le nombre d'instructions à écrire. A l'inverse, si la procédure de traduction est un jour automatisée, l'absence de simplifications ne perturbera pas le fonctionnement des réseaux.

Les simplifications portant sur le réseau représentant le ferme-porte sont regroupées dans le Tableau 11 et commentées ci-dessous.

Vérification et simplification	Phase K	$X_{ci,1} : \{ip; P_2; \Delta t_2\}$ $X_{vi,1} : \{Po_2; R_2; t_2\}$ $X_{cp,1} : \dots$ $X_{vp,1} : \dots$ $X_{im,1} : \{R_1(X_{vp,3}); t_1(X_{vp,3})\}$ $e_{1,1} : \dots$ $e_{2,1} : R_1(X_{vp,3}) \wedge (t \geq t_1(X_{vp,3}) + \Delta t_2) \wedge Po_2$ $j_{1,1} : Po_2 = U(1; 100) \leq (P_2 \times 100)$ $j_{2,1} : R_2; t_2 = t$
---------------------------------------	----------------	---

TABEAU 11 : LA PHASE DE VÉRIFICATION ET DE SIMPLIFICATION DU RÉSEAU REPRÉSENTANT LE FERME-PORTE

Les variables Δt_2 et t_1 sont éliminées. En effet, puisque **la valeur de Δt_2 est nulle**, son utilisation pour représenter un délai de synchronisation (cf. $e_{2,1}$) est inutile. La variable $t_1(X_{vp,3})$, qui sert à assurer la synchronisation entre les deux processus d'action n°1 et n°2 devient alors également inutile.

Les variables R_2 et t_2 sont éliminées car elles n'apparaissent dans aucune condition de sensibilisation du réseau. Autrement dit, elles ne sont **pas utilisées** pour modéliser un **enchaînement d'événements** dans le réseau. Elles sont par conséquent inutiles.

Enfin, la variable R_1 et sa variable image $R_1(X_{vp,3})$ sont éliminées. En raison de la fusion entre les transitions $T_{2,1}$ (le ferme-porte ferme la porte) et $T_{5,3}$ (la porte est refermée), les deux transitions ne peuvent être tirées que si les places $P_{4,3}$ (la porte est ouverte) et $P_{2,1}$ (le ferme-porte est prêt à la fermer) sont toutes deux marquées. Puisque **ce marquage indique déjà que la porte est ouverte** ($P_{4,3}$ marquée), cette variable R_1 portant exactement la même information (la porte est ouverte) constitue un doublon inutile.

Le réseau correspond maintenant en tout point à celui présenté au paragraphe II.B. La construction de cet exemple est achevée. Les exemples de la construction des réseaux représentant l'occupant et la porte sont disponibles en annexes.

**SYNTHÈSE DU
CHAPITRE :**

Ce chapitre a mis en évidence que les concepts de découpage systémique sont adaptés aux réseaux de Petri PTD-OO pour deux raisons. D'une part, parce que le découpage de la structure du système en entités permet de faire émerger des objets et ainsi d'identifier les futurs RDPE. D'autre part, parce que le découpage de l'activité du système en processus élémentaires est utilisé afin de construire la structure et les annotations des RDPE. Pour cela, à chaque processus élémentaire sont associées soit une fonction continue (cas d'une transformation continue de masse et d'énergie), soit une ou plusieurs transitions (cas d'une transformation discrète de masse, d'énergie, d'information ou de personne). Ensuite, les interactions entre processus élémentaires (enchaînement, empêchement, perturbation du transfert, sens du transfert, etc.) sont utilisées pour construire les arcs, les conditions de sensibilisation et les fonctions de jonction.

Cinquième chapitre : APPLICATION PRATIQUE

OBJECTIFS DU CHAPITRE :

L'objectif de ce chapitre est :

- d'illustrer à la fois la démarche de la méthode idéale proposée au second chapitre et la méthode ISI-Systema détaillée aux troisième et quatrième chapitre ;
- de présenter les résultats de cette application ;
- d'identifier des perspectives d'amélioration qui n'auraient pas déjà été identifiées au second chapitre.

MÉTHODOLOGIE :

Méthodologie :

- *dans un premier temps, une application a été sélectionnée ;*
- *dans un deuxième temps, une étude préalable a été menée. Cette étude revenait à :*
 - *constituer un groupe de travail ;*
 - *cerner le cadre de l'étude et l'objet de l'étude ;*
 - *définir des mesures de sécurité, des objectifs de sécurité et des E.N.S.*
- *dans un troisième temps, une trame a été construite avec le langage ISI-Systema défini au troisième chapitre ;*
- *dans un quatrième temps, la trame a été traduite en réseaux de Petri en utilisant la procédure de traduction définie au quatrième chapitre ;*
- *dans un cinquième temps, les résultats fournis par SCHEMA-SI ont été collectés.*

I. SÉLECTION DE L'APPLICATION

Le 12 mars 2007, un incendie s'est déclaré dans un foyer pour personnes âgées situé dans le Val-de-Marne. Ce sinistre a fait l'objet d'une analyse détaillée dans le but de reconstituer les principales étapes de son développement, et de collecter les principales données relatives aux dégâts. Pour ces raisons, ce sinistre a constitué une opportunité d'utiliser SCHEMA-SI et donc de mettre en œuvre la méthode ISI-Systema. Dans l'optique de présenter la présente application pratique, nous allons suivre la démarche de la méthode idéale définie au second chapitre. La méthode ISI-Systema, qui n'est qu'une sous partie de la méthode idéale, occupe les paragraphes III et IV. De plus, dans ce chapitre, les résultats obtenus (cf. paragraphe V) ne seront présentés qu'à titre illustratif, avec plutôt l'objectif de montrer le support fourni au groupe de travail pour prendre une décision que celui de discriminer des stratégies de sécurité.

II. ANALYSE PRÉALABLE

II.A Constitution d'un groupe de travail et définition du cadre de l'étude

Cette étude a été réalisée par les personnes suivantes :

- Philippe Fromy, ingénieur au CSTB ;
- François Demouge, ingénieur au CSTB ;
- Pascal Gouery, lieutenant-colonel de sapeurs-pompiers, chef du bureau prévention de l'Essonne (SDIS 91) ;
- Anne Muller, doctorante de l'Université de Haute-Alsace, en contrat CIFRE avec le CSTB.

II.B Définition de l'objet de l'étude

Après avoir décrit les lieux étudiés ainsi que leur environnement spatial, le contexte réglementaire est défini. L'identification du contexte réglementaire est ici importante car les mesures de sécurité proposées en II.D s'inspirent en grande partie des textes applicables.

II.B.a) Description des lieux étudiés

Locaux retenus pour l'étude

Le logement-foyer comprend six étages sur rez-de-chaussée et sous-sol. Les étages sont desservis par un escalier encoisonné et par deux ascenseurs. Au total, le logement-foyer comprend :

- au rez-de-chaussée : une entrée, une salle de restauration, une salle d'activités et un bureau ;
- aux étages : un logement de fonction et quatre-vingt studios desservis par des circulations horizontales communes (abrégées CHC).

Puisque les six étages sont similaires dans ce bâtiment, le groupe de travail a choisi de n'en étudier qu'un seul, et d'y adjoindre la cage d'escalier. Le couple « **étage – cage d'escalier** » constitue donc ici le **système étudié**. Par hypothèse, la cage d'escalier rejoint directement le milieu extérieur, qui constitue ici l'environnement du système étudié.

L'étage étudié se compose de quatorze studios également répartis en deux ailes (aile n°1 et aile n°2) et d'une circulation horizontale commune. Cette dernière se compose de deux couloirs desservant les studios (un pour chaque aile) et d'un hall, donnant sur la cage d'escalier et les ascenseurs.

De manière idéale, il conviendrait de procéder à une modélisation physique dans tous les locaux. Cependant, les ressources de calcul actuellement disponibles ne le permettent pas avec un délai de calcul raisonnable. Par conséquent, un choix doit être effectué pour sélectionner les locaux les plus importants vis-à-vis de l'analyse du risque incendie. Sachant que tous les studios sont identiques, le groupe de travail a posé les deux hypothèses suivantes :

- le feu démarre toujours dans l'un des studios de l'aile 1, distingué des autres par l'appellation « studio sinistré » (c'est ce qui s'est passé lors du sinistre du 12 mars 2007) ;
- le feu et la fumée ne peuvent se propager qu'au studio sinistré, aux couloirs des deux ailes et au hall.

En conséquence, **seuls quatre locaux d'un même étage** sont retenus pour une **modélisation physique** (cf. locaux grisés sur la Figure 70). Les **autres studios de cet étage et la cage d'escalier** sont modélisés uniquement **de manière événementielle**, c'est-à-dire qu'ils sont seulement pris en compte par leur position spatiale et leur contenu (p. ex. : des occupants, du contenu combustible, etc.).

Ouvrants : portes et fenêtres

Chaque studio donne sur le couloir d'une aile (n°1 ou n°2) par une porte, et sur l'extérieur par une porte-fenêtre.

Chaque couloir des ailes donne sur les studios de l'aile (n°1 ou n°2), et sur l'extérieur par des fenêtres au nombre de deux fenêtres dans l'aile n°2 et d'une dans l'aile n°1.

Le hall communique avec la cage d'escalier par une porte, appelée porte palière.

La cage d'escalier donne sur le hall et sur l'extérieur par une porte.

Schéma synthétique

La Figure 70 repère la disposition spatiale des locaux les uns par rapport aux autres. En outre, les ouvrants importants sont localisés (cf. barres vertes sur la Figure 70) et les locaux retenus pour une modélisation physique sont repérés par des motifs grisés. Les autres studios sont repérés en jaune pour l'aile n°1 et en rose pour l'aile n°2, la cage d'escalier, quant à elle, est repérée en bleu.

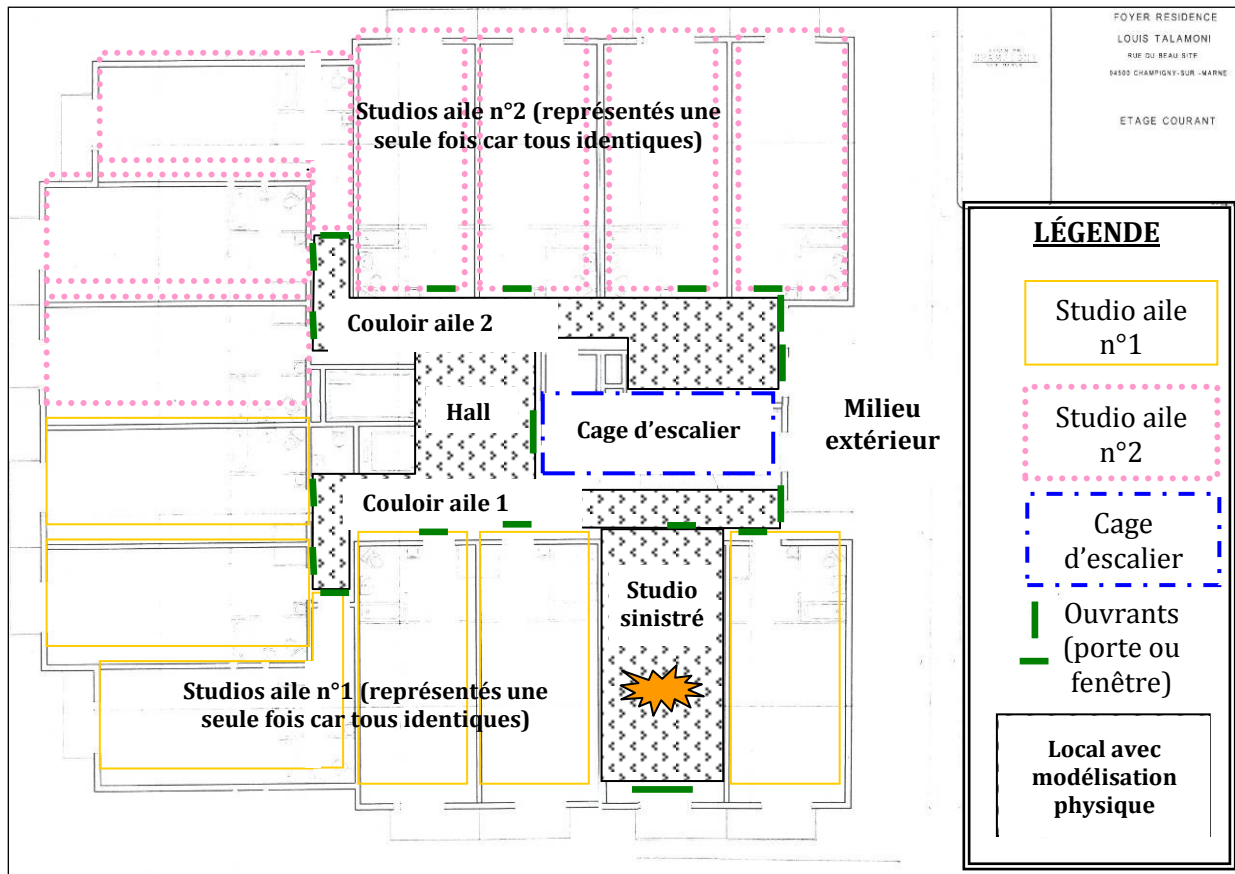


FIGURE 70 : IDENTIFICATION DES ESPACES ET DES OUVRANTS CONCERNÉS PAR L'ÉTUDE

L'ensemble des studios d'une même aile (à l'exclusion du studio sinistré) sont identiques, c'est pourquoi il est admis que les équipements qu'ils contiennent et occupants qui les occupent ont les mêmes caractéristiques. En conséquence, les studios et leur contenu ne sont représentés qu'une seule fois au lieu d'autant de fois que de studios identiques dans l'aile. Cette hypothèse permet de réduire la taille et la complexité du modèle utilisé.

Il en découle que le système étudié est composé des locaux suivants :

- un studio où le feu démarre, situé dans l'aile n°1, appelé dans la suite du document **studio sinistré** ;
- un studio de l'aile n°1 représentant tous les studios de l'aile n°1 différents du studio sinistré, appelé **autres studios de l'aile n°1** ;
- un studio de l'aile n°2 représentant tous les studios de l'aile n°2, appelé **autres studios de l'aile n°2** ;
- un couloir, situé dans l'aile n°1, appelé **couloir de l'aile n°1** ;
- un couloir, situé dans l'aile n°2, appelé **couloir de l'aile n°2** ;

- un hall, appelé **hall** ;
- une cage d'escalier, appelée **cage d'escalier**.

A ces locaux, il faut ajouter l'environnement du système (appelé également milieu extérieur) pour compléter la description.

Rappel :

Les couloirs des ailes n°1 et n°2 ainsi que le hall composent la CHC (circulation horizontale commune). Le terme de CHC sera utilisé plus loin dans le document pour désigner ces trois locaux.

II.B.b) Description de l'environnement des lieux étudiés

Le logement-foyer se situe en banlieue parisienne. Il est visible de deux rues voisines. D'ailleurs, lors du sinistre du 12 mars, la personne qui a appelé les secours passait à proximité lorsqu'elle a vu un panache de fumée sortant d'une fenêtre. Afin d'illustrer une possibilité d'interaction entre l'environnement et le système, ce passant a été conservé dans la présente étude.

Lors du sinistre du 12 mars, les secours ont mis environ 10 minutes pour arriver sur les lieux. Partant de cette constatation, l'hypothèse d'un délai court entre l'alerte des secours et leur arrivée sur le site est cohérente.

Enfin, nous admettons que l'étage étudié se situe à 7,5 m du sol (il s'agit de l'étage sinistré le 12 mars 2010). Cette hauteur est utilisée pour le calcul des pressions de part et d'autre des ouvrants.

II.B.c) Contexte réglementaire

L'établissement étudié est classable en **logement-foyer** pour la **partie habitation** (p. ex. : les studios) et d'un **établissement recevant du public** du 2^{ème} groupe pour les **locaux communs** (p. ex. : salle de restauration, salle d'activités).

D'après les renseignements obtenus auprès de la société propriétaire de l'immeuble, ni la partie habitation ni les locaux communs n'ont subi de modification depuis le permis de construire. En raison du principe de non-rétroactivité, le logement-foyer dépend donc des textes en vigueur au moment de la construction c'est-à-dire :

- l'arrêté du 31 janvier 1986 relatif à la sécurité incendie dans les immeubles d'habitation pour la **partie habitation** ;
- les arrêtés du 25 juin 1980 (dispositions générales) et du 23 mai 1989 (dispositions particulières du **type U**, soit établissements de soin) pour les **locaux communs**.

La réhabilitation de l'établissement suite à l'incendie du 12 Mars 2007 entraîne son assujettissement à la réglementation actuelle, à savoir :

- l'arrêté du 31 janvier 1986 modifié relatif à la sécurité incendie dans les immeubles d'habitation pour la **partie habitation** ;
- les arrêtés du 25 juin 1980 (dispositions générales) et du 19 novembre 2001 (dispositions particulières du **type J**, soit une structure d'accueil pour personnes âgées et/ou handicapées⁵²) pour les **locaux communs**.

⁵² Un établissement est de type J s'il a pour vocation principale d'héberger des personnes âgées présentant des difficultés d'autonomie et si sa capacité d'hébergement est supérieure ou égale à 25 personnes

II.C Définition des objectifs à atteindre et des événements non souhaités

II.C.a) Objectifs stratégiques

Puisque les objectifs stratégiques diffèrent selon les acteurs, ils seront présentés acteur par acteur.

Pour le CSTB, l'objectif principal était avant tout d'associer Pascal Gouery (le lieutenant-colonel de sapeurs-pompiers cité précédemment) au projet afin d'estimer l'apport de la simulation pour la prévention incendie. En outre, l'étude devait permettre d'identifier de nouvelles perspectives d'amélioration en évaluant la pertinence des hypothèses, l'adéquation de la finesse de la description avec les objectifs ou encore en testant l'outil SCHEMA-SI sur un cas pratique.

Pour le préventionniste, l'objectif de l'étude était d'affiner sa perception de l'efficacité des mesures qu'il imaginait pour la mise en sécurité de l'établissement. En d'autres termes, cette étude était pour lui une opportunité de tester son intuition quant à la pertinence des mesures de sécurité.

II.C.b) Objectifs de sécurité

Les objectifs de sécurité retenus pour l'étude sont déclinés comme suit :

- protéger la vie de tous les résidents du foyer, y compris celle de l'habitant de l'appartement où le feu démarre ;
- limiter les dégâts aux biens immobiliers et mobiliers du foyer et préserver la capacité opérationnelle.

Dans la présente étude, s'appuyant sur le retour d'expérience du 12 mars, l'hypothèse que ni les tiers, ni les services de secours n'étaient vulnérables a été posée. En outre, ni la protection de l'environnement ni celle des biens avoisinants n'ont été considérées. Enfin, l'établissement n'ayant pas spécialement de valeur culturelle, la dégradation de l'image de marque ainsi que celle du patrimoine architecturale, culturel et historique n'ont pas non plus été considérées.

II.C.c) Événements non souhaités

L'analyse de la performance d'une stratégie de sécurité passe par l'évaluation quantitative du risque incendie. La stratégie de sécurité est d'autant plus performante que le risque résultant est faible. L'évaluation du risque s'attache à calculer la fréquence d'occurrence d'événements non souhaités (E.N.S.), leur gravité et leur acceptabilité. Leur occurrence traduit l'échec d'un ou de plusieurs objectifs de sécurité. Cependant, prédire l'occurrence d'un E.N.S. requiert la définition préalable de critères de réalisation de cet E.N.S. Le tableau suivant regroupe les E.N.S. et les critères de réalisation associés. Ce tableau est commenté dans les paragraphes suivants.

Objectifs de sécurité	E.N.S associé	Critères d'atteinte de l'E.N.S.
vie des résidents	E.N.S. n°1 : décès de l'occupant du studio sinistré	a) si la personne se situe dans la CHC ou dans le studio n°1 : conditions physiques supérieures ou égales aux conditions létales b) si la personne se situe dans un autre studio : résistance au feu de la porte du studio dépassée
	E.N.S. n°2 : décès des occupants des autres studios de l'aile n°1	
	E.N.S. n°3 : décès des occupants des autres studios de l'aile n°2	

Objectifs de sécurité	E.N.S associé	Critères d'atteinte de l'E.N.S.
biens immobiliers, biens mobiliers et capacité opérationnelle	E.N.S. n°4 : extension de l'incendie à l'autre studio de l'aile n°1	résistance au feu des portes des studios de l'aile n°1 dépassée
	E.N.S. n°5 : extension de l'incendie à l'autre studio de l'aile n°2	résistance au feu des portes des studios de l'aile n°2 dépassée
	E.N.S. n°6 : extension de l'incendie à la cage d'escalier	résistance au feu de la porte palière dépassée

TABLEAU 12 : E.N.S. ET CRITÈRES DE PERFORMANCE ASSOCIÉS POUR L'APPLICATION PRATIQUE

Critères de réalisation d'E.N.S. associés à la sauvegarde de la vie

Il apparaît de la première ligne du Tableau 12 qu'il existe deux critères différents. L'un concerne les locaux pris en compte par le modèle physique (comme la CHC et le studio sinistré) et l'autre les locaux non pris en compte par ce modèle (comme les autres studios). Ces deux critères sont détaillés ci-après.

Cas a) Studio sinistré et CHC

Lorsque le local j est pris en compte dans le modèle physique, les conditions qui y règnent sont connues et peuvent être utilisées pour construire des critères de réalisation d'E.N.S. L'expression de ces critères consiste à comparer des **variables de seuil** préalablement définies à des **variables d'état** dont la valeur est prédite par le modèle physique. Dans l'application pratique, les variables d'état et de seuil retenues sont regroupées dans le tableau suivant.

Variables d'état	Variables de seuil	
hauteur d'interface thermique du local j : Z^j	$Z_s^j = 1,80 \text{ m}$	
température de la zone basse du local j : T_{zb}^j	$T_{zb,s}^j = 50^\circ\text{C}$	
température de la zone haute du local j : T_{zh}^j	$T_{zh,s1}^j = 50^\circ\text{C}$	$T_{zh,s2}^j = 200^\circ\text{C}$

TABLEAU 13 : VARIABLES NÉCESSAIRES POUR CONSTRUIRE DES CRITÈRES DE LÉTALITÉ

Les critères, inspirés des références bibliographiques citées dans le premier chapitre, sont regroupés dans la figure suivante.

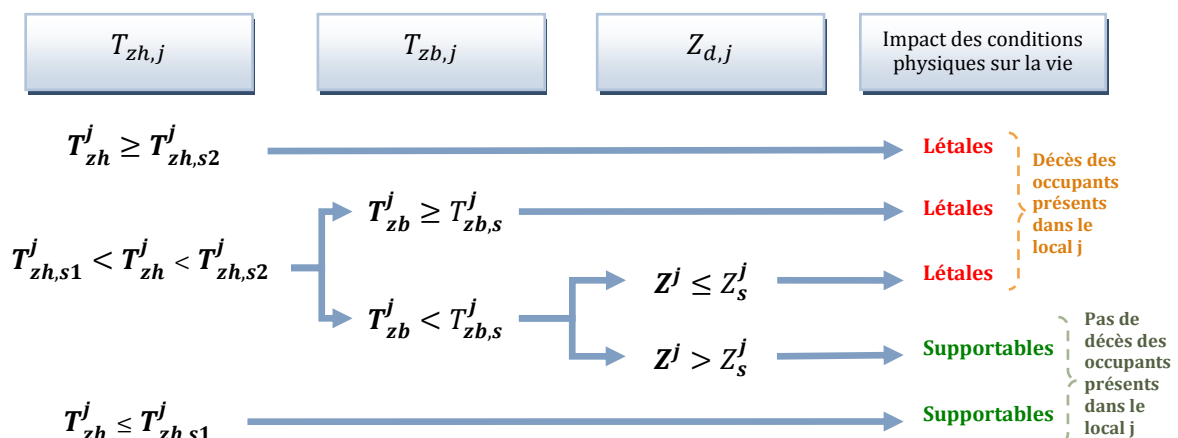


FIGURE 71 : CRITÈRES RETENUS POUR DÉFINIR LA LÉTALITÉ

Cas b) Autres studios des ailes n°1 et n°2

Lorsque le local n'est pas pris en compte dans le modèle physique, les conditions qui y règnent sont inconnues. Il n'est donc pas possible de construire des critères de réalisation faisant intervenir des grandeurs telles que la température ou la hauteur d'interface thermique (c'est-à-dire libre la hauteur de fumée). Dans l'application pratique, il a été décidé que l'occupant d'un autre studio y restait vivant tant que la porte de ce studio résistait au feu. En d'autres termes, nous considérons que si la porte du studio se ruine alors que l'occupant y est présent, alors ce dernier décède. Cette hypothèse se justifie puisque la porte constitue la seule échappatoire possible, l'espérance de vie de la personne présente en cas de ruine de cette porte est quasiment nulle. Par ailleurs, les conditions de ruine des portes sont détaillées dans le paragraphe III.D.g).

Critères de réalisation d'E.N.S. associés à la sauvegarde des biens

Nous considérons que tant que les portes résistent au feu, l'incendie ne se propage pas aux locaux derrière ces portes. A l'inverse, si ces portes se ruinent au cours de la simulation (cf. III.D.g), alors nous estimons que l'incendie se propage et que les E.N.S sont réalisés.

II.D Sélection de mesures correctives à évaluer et construction de stratégies de sécurité

Les mesures proposées par Pascal Gouery, détaillées ci-dessous, s'inspirent des principes de sécurité des ERP de type J.

- 1. Compartimentage de la CHC.** Cette mesure de recouplement vise à séparer la CHC en trois compartiments à l'aide de deux portes dites portes de recouplement, situées aux interfaces entre le hall et les ailes.
- 2. Ferme-porte à fermeture automatique des portes de recouplement de la CHC.** La commande automatique est asservie sans délai à un détecteur situé dans l'aile n°1.
- 3. Ouverture automatique des fenêtres de la CHC.** La commande automatique est asservie sans délai à un détecteur situé dans l'aile n°1. La ventilation est assurée dans chaque aile par une fenêtre.
- 4. Système de détection incendie dans la CHC.** Un détecteur automatique de fumée est présent dans l'aile n°1. Il commande sans délai l'ouverture des fenêtres de la CHC et la fermeture des portes de recouplement (s'ils existent).
- 5. Alarme générale immédiate.** L'alarme est asservie uniquement à un déclencheur manuel, situé à l'étage, dans le hall.

Remarque :

La mesure n°3 ne correspond pas à un véritable système de désenfumage puisqu'aucune distinction entre les arrivées d'air en partie basse et les évacuations de fumée en partie haute n'est faite.

Les mesures susmentionnées sont associées pour faire émerger les quatre stratégies énoncées ci-dessous :

- Stratégie A.** Configuration actuelle de l'établissement. Absence de recoupement, de ventilation et de détection. Elle s'appuie uniquement sur la mesure n°5.
- Stratégie B.** Recoupement de la CHC. Elle vise à préserver de la fumée et de la chaleur le hall et l'aile n°2. Elle s'appuie sur les mesures n°1, n°2, n°4 et n°5.
- Stratégie C.** Ouverture automatique des fenêtres de la CHC. Elle vise à évacuer les gaz chauds présents dans la CHC à l'extérieur du bâtiment. L'ouverture des ouvrants de façade est asservie à une détection dans la circulation. Elle s'appuie sur les mesures n°3, n°4 et n°5.
- Stratégie D.** Recoupement et ouverture automatique des fenêtres de la CHC. Elle s'appuie sur l'ensemble des 5 mesures.

III. CONSTRUCTION DE LA TRAME PAR LE GROUPE DE TRAVAIL À L'AIDE DU LANGAGE ISI-SYSTEMA

À partir de ce paragraphe, la méthode ISI-Systema commence. Comme expliqué au troisième chapitre, pour construire une bonne trame, il est nécessaire de réaliser les actions suivantes dans l'ordre indiqué :

- cerner précisément le système étudié (cf. II.B) ;
- identifier toutes les boîtes, les flux et les vannes du système (cf. III.A, III.B et III.C) ;
- identifier tous les processus d'action du système (cf. III.D) ;
- vérifier l'ensemble de la trame (cf. III.E).

III.A Définition des échanges potentiels de masse et d'énergie

Les échanges potentiels de masse et d'énergie entre les entités du système sont regroupés dans la Figure 72, construite à partir du langage ISI-Systema. Sur cette figure, la masse gazeuse et l'énergie sont représentées par des éléments, notés respectivement $m(g)$ et $E(U)$. Les entités capables de créer, de détruire et/ou de stocker du gaz et/ou de l'énergie sont représentées par des boîtes. Enfin, les échanges potentiels de gaz et/ou d'énergie sont représentés par des flèches.

Les informations ayant menées à la construction d'une telle figure sont présentées de manière textuelle ci-après.

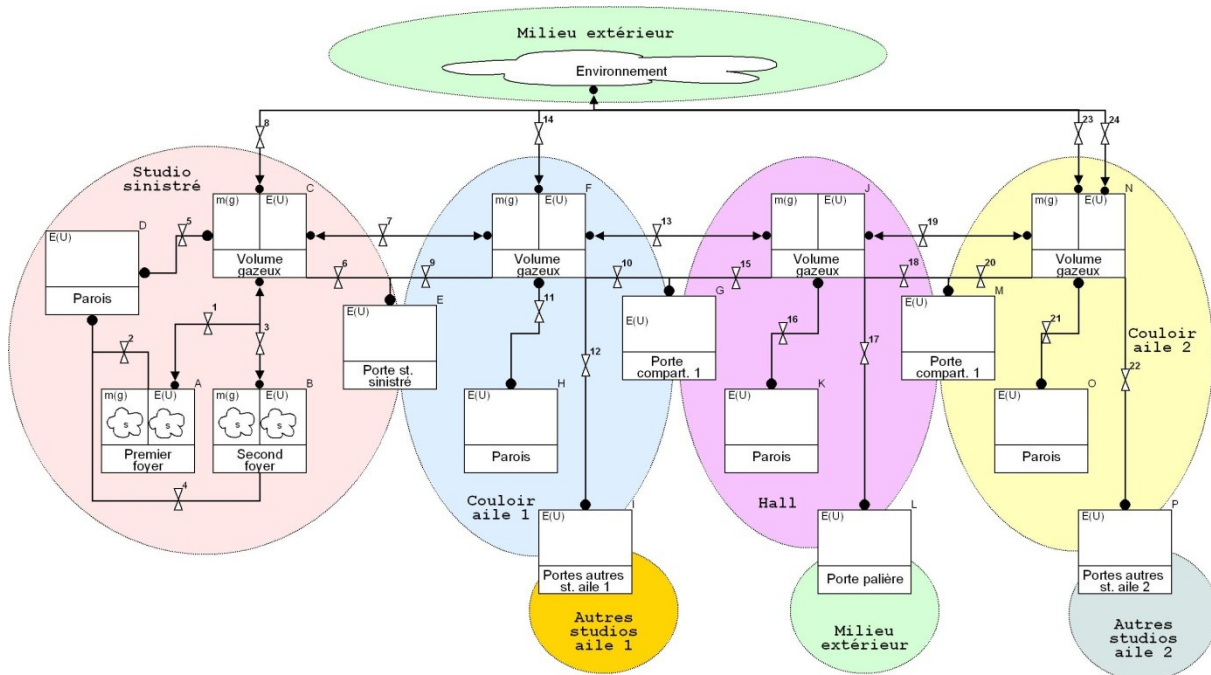


FIGURE 72 : VUE PHYSIQUE DE L'APPLICATION PRATIQUE

Légende :



III.A.a) Volumes de gaz et parois

Chaque local avec modélisation physique est composé *a minima* d'un **volume de gaz** (regroupant les zones hautes et basses du local) et de **parois** (regroupant le plancher, le plafond et les murs du local).

Les volumes de gaz stockent de la masse et de l'énergie. Ils sont donc représentés par des boîtes fonctionnalisées d'un double processus de stockage (cf. boîtes C, F, J et N dans la Figure 72). Les dimensions des volumes de gaz sont les suivantes :

- studio sinistré : 3,60 m x 5 m x 2,50 m
- couloirs des ailes⁵³ n°1 et n°2 : 12 m x 2,50 m x 2,50 m
- hall : 2,50 m x 3,60 m x 2,50 m

Les températures y régnant initialement sont respectivement de 20°C pour le studio sinistré, de 18°C pour le couloir de l'aile n°1, de 19°C pour le hall et de 17°C pour le couloir de l'aile n°2.

Les parois accumulent de l'énergie et sont donc représentées par des boîtes fonctionnalisées d'un simple processus de stockage (cf. boîtes D, H, K et O dans la Figure 72). Les parois ont des

⁵³ Les couloirs des ailes ne sont pas parallélépipédiques alors qu'il s'agit là d'une condition requise pour l'usage d'un modèle de zone. En conséquent, une géométrie équivalente parallélépipédique est construite en préservant la surface totale des parois horizontales et verticales.

caractéristiques thermophysiques représentatives d'un plâtre et leur échauffement est prédit par résolution de l'équation de la chaleur.

Concernant les échanges, ils sont tous prédits par le modèle CIFI 2009. Quantitativement, ils s'établissent comme suit. Tout d'abord, les volumes de gaz des différents locaux et le milieu extérieur échangent de la masse et de l'énergie par les ouvrants (cf. vannes V7, V8, V13, V14, V19, V23, V24 dans la Figure 72). Au cours du temps, ces échanges peuvent avoir lieu dans un sens ou dans un autre, selon les gradients de pression et de température entre les locaux. Ensuite, les parois des différents locaux n'échangent pas de chaleur entre elles (absence de flux les reliant dans la Figure 72). Enfin, les volumes de gaz et les parois échangent de l'énergie, dans un sens ou dans l'autre, selon le gradient de température (cf. vannes V5, V11, V16, V21 dans la Figure 72).

III.A.b) Foyers

Dans cette étude, le feu démarre toujours du studio sinistré. Dans ce local, deux types de foyer peuvent exister : **le premier foyer**, correspondant à un objet isolé brûlant dans la pièce et **le second foyer**, correspondant à l'ensemble des objets de la pièce en feu. Ce dernier cas correspond au phénomène d'embrasement généralisé, également appelé flashover. Chacun des foyers produit du gaz combustible et de la chaleur lorsque ce gaz brûle, c'est pourquoi ils sont représentés par des boîtes fonctionnalisées par des doubles processus de création de gaz et d'énergie dans la Figure 72. Dans cette trame, l'extension du feu aux autres locaux que le studio sinistré n'est pas modélisé par CIFI 2009. En effet, seul le studio sinistré contient des boîtes « foyer » sur la Figure 72.

L'activité d'un foyer désigne l'évolution temporelle du débit énergétique de combustion (ou puissance de feu). Les activités des deux foyers du studio sinistré sont à définir pour construire la trame et sont détaillées dans les paragraphes ci-dessous.

Les échanges de gaz et d'énergie entre les foyers et les autres entités du système (en l'occurrence, les parois et le volume de gaz) sont représentés par des flux dans la Figure 72 (cf. vannes V1, V2, V3 et V4) et prédits par le modèle CIFI 2009.

Remarque :

Les deux foyers ne peuvent pas coexister puisque le second foyer comprend le premier foyer auquel sont ajoutés d'autres objets combustibles.

Premier foyer (cf. boîte A dans la Figure 72)

Nous avons souhaité représenter le développement de l'activité du premier foyer en deux phases, une **phase de démarrage** et une **phase de développement**.

Durant la phase de démarrage, un premier objet commence à brûler suite à un allumage accidentel. Ce foyer dégage de plus en plus de gaz combustible et de chaleur à mesure que l'objet brûle. Si le foyer dispose de conditions d'aération suffisantes⁵⁴, la puissance croît jusqu'à

⁵⁴ Les conditions d'aération du foyer ainsi que la limitation du débit calorifique par l'appauvrissement en oxygène et par une température insuffisante sont prédits par CIFI 2009

atteindre 300 kW au bout d'une durée choisie aléatoirement à chaque scénario entre 3 et 7 minutes⁵⁵.

Durant la phase de développement de feu, l'activité du foyer augmente au fur et à mesure que la surface de l'objet en feu s'étend. Selon les scénarios, le délai pour que tout l'objet se mette à brûler varie entre 1 à 2 minutes, et le débit calorifique maximal obtenu en conditions d'aération optimales varie de 1 et 3 mégawatts.

Ces variations de puissances et de délais nécessaires pour les atteindre permettent de traduire la variabilité des foyers en termes de nature de l'objet combustible (qu'est-ce qui brûle ?) et de cinétique de réactions de pyrolyse et de combustion (comment est-ce que cet objet brûle ?).

Second foyer (cf. boîte B dans la Figure 72)

Si certaines conditions de températures sont réunies (ces conditions seront détaillées dans le processus d'action du paragraphe III.D.e), le feu s'étend rapidement à tous les objets combustibles exposés (mobilier, revêtement, etc.). Le second foyer représente cette extension et son activité se caractérise par une puissance maximale de 7 mégawatts atteinte en 1 minute. Cette valeur de 7 mégawatts correspond à la valeur maximale permise par la ventilation du local lorsque tous les ouvrants sont ouverts. Cette valeur a été calculée selon la formule de corrélation de Kawagoe (Kawagoe, 1958). Cette formule permet de calculer le débit calorifique maximal obtenu dans un local en fonction des dimensions des ouvrants.

III.A.c) Cibles

Outre les parois, les six cibles suivantes peuvent être distinguées :

- la porte du studio sinistré (cf. boîte E dans la Figure 72) ;
- les portes des autres studios de l'aile n°1 (cf. boîte I dans la Figure 72) ;
- la porte de recoupement n°1 (cf. boîte G dans la Figure 72) ;
- la porte palière (cf. boîte L dans la Figure 72) ;
- la porte de recoupement n°2 (cf. boîte M dans la Figure 72) ;
- les portes des autres studios de l'aile n°2 (cf. boîte P dans la Figure 72).

Ces cibles accumulent de l'énergie au cours du temps, et cette énergie accumulée est utilisée pour prédire leur instant de ruine. Les conditions pour que les ouvrants se ruinent sont détaillées dans les processus d'action du paragraphe III.D.g). L'énergie accumulée dans une porte dépend des flux incidents sur la porte (cf. vannes V6, V9, V10, V12, V15, V17, V18, V20, V22 de la Figure 72). En d'autres termes, cette énergie est calculée en fonction des hauteurs d'interface thermiques des gaz à proximité de la (des) face(s) exposée(s) de la porte, du gradient de température entre ces gaz et la porte et d'un coefficient global regroupant les coefficients de convection et de rayonnement.

Remarque :

Dans cette trame, l'énergie stockée par les fenêtres et les portes fenêtres est négligée. Toutefois, leur ruine est tout de même envisagée (cf. paragraphe III.D.g).

⁵⁵ Toutes les valeurs entières sont équiprobables dans l'intervalle considéré

III.A.d) Conditions extérieures

La température extérieure est de 10°C, la pression est de 1 013 hPa et il n'y a pas de vent.

III.B Définition des propagations potentielles de l'alerte

Les échanges potentiels de message d'alerte entre les entités du système sont regroupés dans la Figure 73, construite à partir du langage ISI-Systema. Sur cette figure, le message est représenté par un élément, noté i. Les entités pouvant être alertées ou activées sont représentées par des boîtes. Les possibilités de propagation de l'alerte sont alors représentées par des flèches.

Les informations ayant menées à la construction d'une telle figure sont présentées sous forme textuelle ci-après.

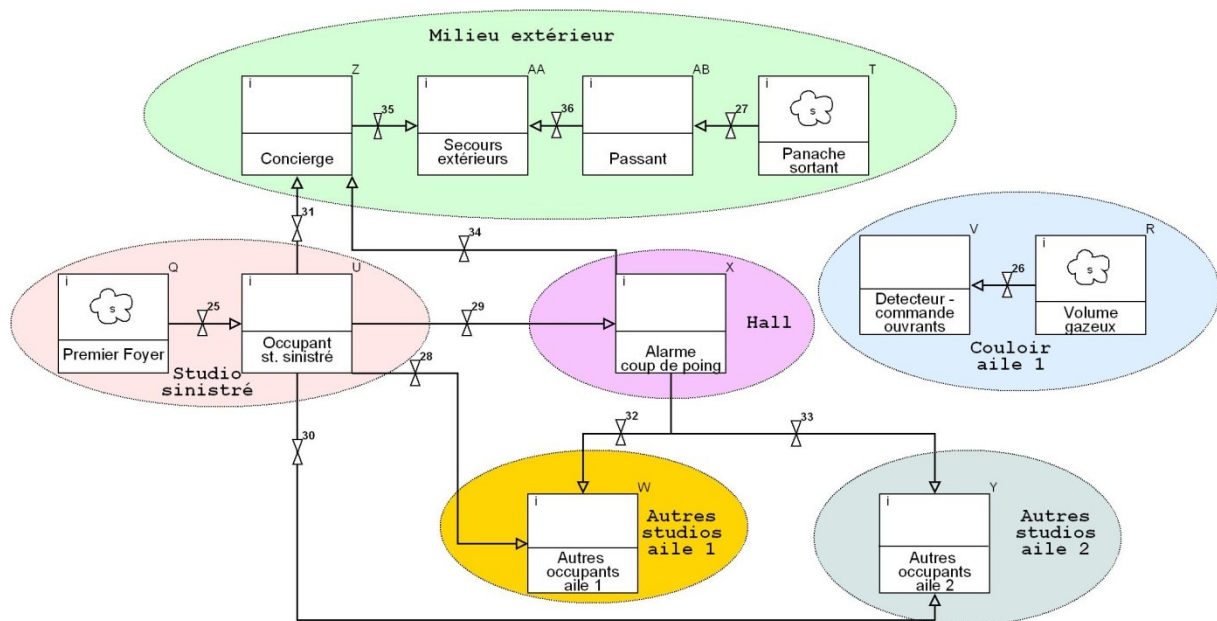
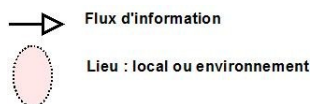


FIGURE 73 : VUE INFORMATION DE L'APPLICATION PRATIQUE

Légende :



III.B.a) Signaux de danger

Un signal de danger est un vecteur d'information, potentiellement reçue par une autre entité (phénomène de détection). Dans cette application, le danger peut être détecté par trois vecteurs :

- le premier foyer (cf. boîte Q de la Figure 73) ;
- la fumée présente dans le volume gazeux du couloir (cf. boîte R de la Figure 73) ;
- un panache de fumée sortant dans le milieu extérieur, par l'intermédiaire de l'une des fenêtres (cf. boîte T de la Figure 73).

Les conditions pour que la détection survienne sont détaillées dans les processus d'action du paragraphe III.D.c).

III.B.b) Personnes

Trois entités représentant des individus sont initialement présentes **dans le système** et peuvent prendre conscience de la présence d'un danger dans l'établissement. Elles sont les suivantes :

- l'occupant du studio sinistré, initialement dans son studio (cf. boîte U de la Figure 73) ;
- les occupants des autres studios de l'aile n°1, initialement dans leur studio (cf. boîte W de la Figure 73) ;
- les occupants des autres studios de l'aile n°2, initialement dans leur studio (cf. boîte Y de la Figure 73).

Trois entités représentant des individus sont initialement présentes **dans l'environnement du système** et peuvent prendre conscience de la présence d'un danger dans l'établissement. Elles sont les suivantes :

- le concierge, initialement à un étage différent de l'étage étudié (cf. boîte Z de la Figure 73);
- un passant, initialement dans le voisinage du bâtiment (cf. boîte AB de la Figure 73) ;
- l'équipe de secours extérieur, initialement au centre de secours (cf. boîte AA de la Figure 73).

Seuls deux individus peuvent détecter les signaux de danger : l'occupant du studio sinistré d'une part, qui détecte la présence du premier foyer (cf. vanne V25 de la Figure 73) ; et le passant d'autre part, qui détecte le panache sortant d'un ouvrant (cf. vanne V27 de la Figure 73). Une fois cette prise de conscience accomplie, ces deux individus vont potentiellement entrer dans une chaîne de propagation de l'alerte dont le détail peut s'exprimer comme suit.

Tout d'abord, l'occupant du studio sinistré peut alerter les occupants des autres studios, quelle que soit l'aile dans laquelle leur logement se situe (cf. vannes V28 et V30 de la Figure 73). Ensuite, il peut alerter le concierge (cf. vanne V31 de la Figure 73), concierge qui peut à son tour alerter les secours extérieurs (cf. vanne V35 de la Figure 73). Enfin, l'occupant du studio sinistré peut déclencher l'alarme coup-de-poing située dans le hall (cf. vanne V29 de la Figure 73).

Le passant, quant à lui, peut uniquement alerter les secours extérieurs (cf. vanne V36 de la Figure 73).

Les conditions pour que le message soit propagé sont détaillées dans les processus d'action du paragraphe III.D.d).

III.B.c) Équipements du système de sécurité

Deux entités représentant des équipements du système de sécurité pouvant être activés sont présentes dans le système. Il s'agit :

- d'une alarme coup-de-poing située dans le hall (cf. boîte X de la Figure 73) ;
- d'un détecteur situé dans le couloir de l'aile n°1 (cf. boîte V de la Figure 73). Ce détecteur sert à commander la fermeture des portes de recoupement et l'ouverture des fenêtres de la CHC servant à la mesure de ventilation, c'est pourquoi il est nommé « détecteur – commande ventaux ».

L'alarme coup-de-poing n'est potentiellement activée que par l'occupant du studio sinistré (cf. vanne V29 de la Figure 73). Lorsqu'elle retentit, elle est en mesure d'alerter tous les occupants de l'étage et le concierge (cf. vannes V32, V33 et V34 de la Figure 73).

Le détecteur contrôle l'état du gaz présent dans le même local que lui, en l'occurrence le couloir de l'aile n°1 (cf. vanne V26 de la Figure 73). Les conséquences de son activation sur les systèmes

de recouplement et de ventilation sont détaillées dans les processus d'action du paragraphe III.D.d).

III.C Définition des déplacements potentiels de personnes

Les déplacements potentiels de personnes entre les locaux du système et l'environnement sont regroupés dans la Figure 74, construite à partir du langage ISI-Systema. Sur cette figure, les personnes sont représentées par des éléments et les lieux parcourables (les locaux du système ou l'environnement) par des boîtes. Les possibilités de déplacements de personnes de lieu en lieu sont alors représentées par des flèches.

Les informations ayant menées à la construction d'une telle figure sont présentées ci-après.

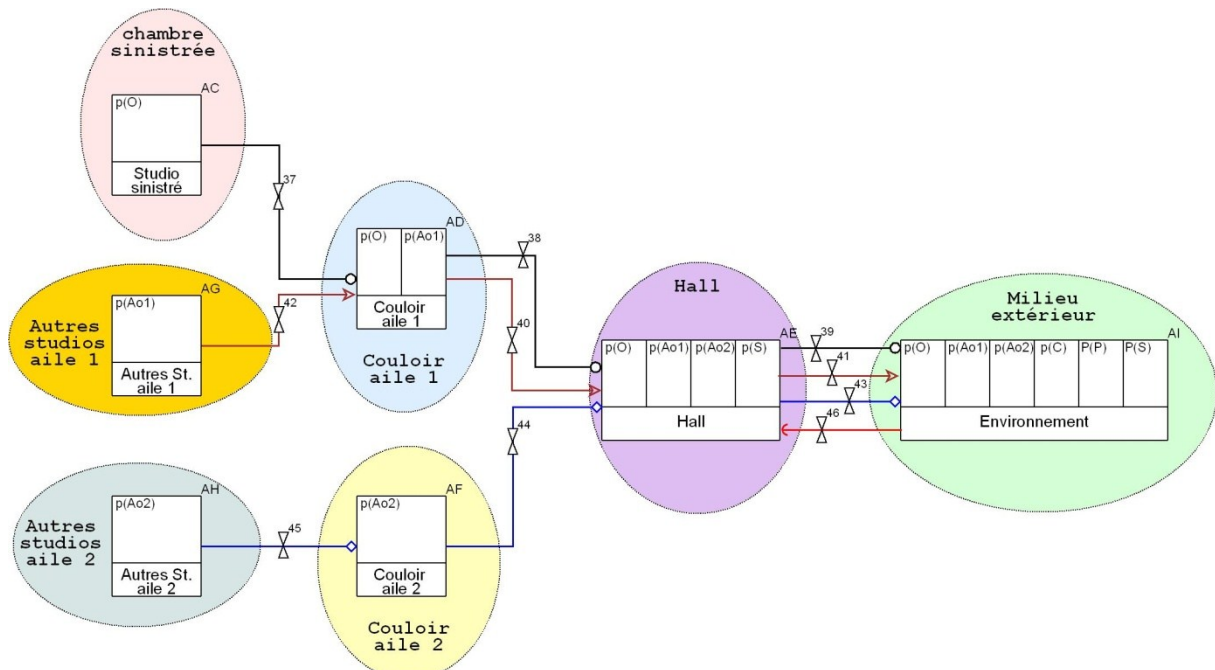


FIGURE 74 : VUE MOUVEMENT DE PERSONNES DE L'APPLICATION PRATIQUE

Légende :



III.C.a) Positions potentielles

Tous les occupants sont initialement dans leur studio. Le passant, le concierge et les secours extérieurs sont dans l'environnement.

En repérant dans le Figure 74 quelle boîte peut stocker quel élément, il est possible de savoir qui peut aller où et ainsi de tirer les informations suivantes.

Au cours d'un scénario, l'occupant du studio sinistré (cf. élément P(O) dans la Figure 74) se situe forcément :

- dans son studio (cf. boîte AC dans la Figure 74) ;
- dans le couloir de l'aile n°1 (cf. boîte AD dans la Figure 74) ;
- dans le hall (cf. boîte AE dans la Figure 74) ;
- ou dans le milieu extérieur (cf. boîte AI dans la Figure 74).

Il ne va jamais ni dans le couloir de l'autre aile (cf. boîte AF dans la Figure 74), ni dans les autres studios (cf. boîtes AG et AH dans la Figure 74). Par hypothèse, quand il prévient les autres occupants, c'est en criant et non en entrant dans leur studio (cf. les processus d'action du paragraphe III.D.d).

De même, les occupants des autres studios de l'aile n°1 se situent forcément au cours d'un scénario :

- dans leur studio (cf. boîte AG dans la Figure 74) ;
- dans le couloir de l'aile n°1 (cf. boîte AD dans la Figure 74) ;
- dans le hall (cf. boîte AE dans la Figure 74) ;
- ou dans le milieu extérieur (cf. boîte AI dans la Figure 74).

Ils ne vont jamais dans ni dans le couloir de l'autre aile (cf. boîte AF dans la Figure 74) ni dans les autres studios (cf. boîtes AC et AH dans la Figure 74).

De plus, les occupants des autres studios de l'aile n°2 se situent forcément au cours d'un scénario :

- dans leur studio (cf. boîte AH dans la Figure 74) ;
- dans le couloir de l'aile n°2 (cf. boîte AF dans la Figure 74) ;
- dans le hall (cf. boîte AE dans la Figure 74) ;
- ou dans le milieu extérieur (cf. boîte AI dans la Figure 74).

Ils ne vont jamais dans ni dans le couloir de l'autre aile (cf. boîte AD dans la Figure 74) ni dans les autres studios (cf. boîtes AC et AG dans la Figure 74).

Le concierge et les passants restent à l'extérieur du système étudié pendant toute la durée des scénarios (cf. boîte AI dans la Figure 74).

Enfin, les secours extérieurs se situent forcément :

- à l'extérieur du système (cf. boîte AI dans la Figure 74) ;
- ou dans le hall (cf. boîte AE dans la Figure 74).

Ils ne vont jamais dans les autres locaux du système, ce qui signifie ici que leur intervention dans l'établissement n'est pas détaillée. De même, leur parcours à l'extérieur du système n'est pas non plus détaillé puisqu'il n'existe qu'une seule boîte « environnement » dans la Figure 74.

III.C.b) Parcours potentiels

Les occupants sortent du bâtiment et ne font jamais demi-tour (tous les flux les représentants convergent vers l'environnement dans la Figure 74). Les secours extérieurs entrent dans le bâtiment par la porte palière pour intervenir. Leur sortie du bâtiment après intervention sort du cadre de l'étude et n'est pas représentée.

III.D Définition de l'ensemble des événements du système

Les processus d'action correspondent aux événements de la trame. Ces processus permettent de définir les conditions à respecter pour que les potentialités définies ci-avant se réalisent ou s'inhibent. Afin d'éviter que ces processus ne prennent trop de place, et aussi pour faciliter leur construction, décision a été prise de présenter plutôt sous forme de tableau que sous forme graphique (comme sur la Figure 43 du troisième chapitre). Toutefois, quelle que soit la représentation choisie, les informations apportées restent rigoureusement identiques.

III.D.a) Vulnérabilité des personnes

Dans cette application, seuls les occupants sont vulnérables à l'incendie et peuvent perdre la vie. Ni les secours, ni le concierge, ni le passant ne peuvent être atteints par l'incendie. En outre, les occupants sont considérés comme saufs lorsqu'ils atteignent l'extérieur du système (p. ex. : la cage d'escalier ou l'extérieur du bâtiment). Enfin, le décès est binaire, c'est-à-dire que soit un individu est vivant et réalise les actions prévues : soit il est décédé et n'est plus capable de les réaliser. Autrement dit, les délais et les fréquences de réalisation d'action ne sont pas corrélés avec la dégradation des conditions physiques dans le système (p. ex. : dans cette trame, l'occupant ne se déplacera pas plus doucement parce qu'il y a de la fumée).

Les événements du Tableau 14 correspondent aux E.N.S. n°1, n°2 et n°3 définis dans la partie II.C.c). Les PA n°1, n°2, n°4 et n°6 du Tableau 14 correspondent aux critères de réalisation d'E.N.S. valables pour des locaux pris en compte par le modèle physique. A l'inverse, les PA n°3 et n°5 du même tableau correspondent aux critères de réalisation d'E.N.S. valables pour des locaux qui ne sont pas pris en compte par le modèle physique.

N° PA	Événement analysé - action			Système acteur				Système cible		Événements terminaux
	Vanne	Type d'action	Représentation de l'action ou de la vanne	Entité source	Événement initiateur	Délai (dt)	Fréquence d'occurrence (P)	État initial de la vanne	État final de la vanne	
1	25;28;29;30;31;37;38;39	fermer et bloquer	perte de la vie	volume de gaz studio (abrégé st.) sinistré	conditions létales atteintes en présence de l'occupant	dt=0	P=1	ouvert ou fermé	bloqué fermé	décès occupant st. sinistré dans studio
2	25;28;29;30;31;37;38;39	fermer et bloquer	perte de la vie	volume de gaz couloir aile 1 ou hall	conditions létales atteintes en présence de l'occupant	dt=0	P=1	ouvert ou fermé	bloqué fermé	décès occupant st. sinistré dans les circulations
3	28;32;40;41;42	fermer et bloquer	perte de la vie	portes autres st. aile 1	portes autres st. aile 2 ruinées en présence de l'occupant	dt=0	P=1	ouvert ou fermé	bloqué fermé	décès autres occupants aile 1 dans studio
4	28;32;40;41;42	fermer et bloquer	perte de la vie	volume de gaz couloir aile 1 ou hall	conditions létales atteintes en présence de l'occupant	dt=0	P=1	ouvert ou fermé	bloqué fermé	décès autres occupants aile 1 dans circulations
5	30;33;43;44;45	fermer et bloquer	perte de la vie	portes autres st. aile 2	portes autres st. aile 2 ruinées en présence de l'occupant	dt=0	P=1	ouvert ou fermé	bloqué fermé	décès autres occupants aile 2 dans studio
6	30;33;43;44;45	fermer et bloquer	perte de la vie	volume de gaz couloir aile 2 ou hall	conditions létales atteintes en présence de l'occupant	dt=0	P=1	ouvert ou fermé	bloqué fermé	décès autres occupants aile 2 dans circulations

TABLEAU 14 : PROCESSUS D'ACTION DE L'APPLICATION PRATIQUE – VULNÉRABILITÉ DES OCCUPANTS

III.D.b) Déplacements des personnes

Les paragraphes suivants détaillent les déplacements des personnes vivantes dans et hors de l'établissement.

Conditions pour que les déplacements se produisent

Occupant du studio sinistré

L'occupant n°1 quitte son studio toujours après avoir été alerté et met entre 30 secondes et 1 minute avant de commencer à évacuer (cf. PA n°7 dans le Tableau 15). Ce délai englobe le temps

nécessaire à la prise de décision d'évacuer et à la réalisation de quelques actions avant de sortir du studio. Il continue ensuite son chemin vers la sortie et met entre 15 secondes et 1 minute 30 pour traverser l'aile n°1 et pénétrer dans le hall (cf. PA n°8 dans le Tableau 15). Ce délai englobe le temps nécessaire pour se déplacer, pour déclencher l'alarme et pour alerter les autres occupants. Après cette étape, l'occupant parcourt le hall et met entre 15 secondes et 30 secondes pour pénétrer dans la cage d'escalier et sortir (cf. PA n°9 dans le Tableau 15). À partir de cet instant, il est sauf.

À aucun moment le confinement de l'occupant dans son studio n'est considéré puisque son studio n'est pas un refuge sûr.

N° PA	Événement analysé - action			Système acteur				Système cible		Événements terminaux
	Vanne	Type d'action	Représentation de l'action ou de la vanne	Entité source	Événement initiateur	Délai	Fréquence d'occurrence	État initial de la vanne	État final de la vanne	
7	37	ouvrir	décision de sortir	occupant st. sinistré	occupant st. sinistré alerté	dt=[30;60]"	P=1	fermé	ouvert	occupant st. sinistré dans couloir aile 1
8	38	ouvrir	décision de sortir	occupant st. sinistré	occupant st. sinistré dans couloir aile 1	dt=[15;90]"	P=1	fermé	ouvert	occupant st. sinistré dans hall
9	39	ouvrir	décision de sortir	occupant st. sinistré	occupant st. sinistré dans hall	dt=[15;30]"	P=1	fermé	ouvert	occupant st. sinistré à l'extérieur du système

TABLEAU 15 : PROCESSUS D'ACTION DE L'APPLICATION PRATIQUE – DÉPLACEMENTS DE L'OCCUPANT DU STUDIO SINISTRÉ

Occupants des autres studios de l'aile n°1

Les occupants des autres studios de l'aile n°1 peuvent sortir de leur studio en ignorant la présence du danger (cf. PA n°11 dans le Tableau 16) ou après avoir été alertés (cf. PA n°10 dans le Tableau 16). Le premier cas correspond à une situation où l'occupant déciderait de sortir de chez lui pour une raison quelconque et pourrait se retrouver pris dans l'incendie. Cette sortie peut survenir n'importe quand pendant les quarante premières minutes du sinistre. Le deuxième cas correspond à une situation où l'occupant entend l'alarme ou l'occupant du studio sinistré. Dans ce cas, il met entre 30 secondes et 1 minute pour décider de sortir de chez lui. Ce délai englobe le temps nécessaire à la prise de décision d'évacuer et à la réalisation de quelques actions avant de sortir.

Si, au moment où il sort de son studio (quelle qu'en soit la raison), il constate que les conditions régnant dans le couloir à traverser sont létales, alors, dans la moitié des cas, il reste dans son studio et se confine (cf. PA n°12 dans le Tableau 16). S'il le fait, il ne sortira plus de son studio (la vanne V42 est bloquée). Dans l'autre moitié des cas, il s'engage tout de même dans le couloir, où il décède. C'est ce qui s'est passé lors du sinistre du 12 mars 2007.

Une fois dans le couloir, l'occupant met entre 15 secondes et 1 minute 30 pour le traverser (cf. PA n°13 dans le Tableau 16). Ce délai englobe les différentes distances à parcourir selon l'éloignement du studio aux portes de recoupement. Il englobe également le temps nécessaire pour collecter des informations sur le danger et le temps de la prise de décision d'évacuer. Après cette étape, son évacuation est identique à celle de l'occupant n°1, c'est-à-dire qu'il parcourt le hall et met entre 15 secondes et 30 secondes pour pénétrer dans la cage d'escalier (cf. PA n°14 dans le Tableau 16). Une fois ce point atteint, il est sauf.

N° PA	Événement analysé - action			Système acteur				Système cible		Événements terminaux
	Vanne	Type d'action	Représentation de l'action ou de la vanne	Entité source	Événement initiateur	Délai	Fréquence d'occurrence	État initial de la vanne	État final de la vanne	
10	42	ouvrir	décision de sortir	autres occupants aile 1	autres occupants aile 1 alertés	dt=[30;60]"	P=1	fermé	ouvert	autres occupants aile 1 dans couloir aile 1
11	42	ouvrir	décision de sortir	autres occupants aile 1	/	dt=[0;40]"	P=1	fermé	ouvert	autres occupants aile 1 dans couloir aile 1
12	42	fermer et bloquer	décision de se confiner	volume de gaz couloir aile 1	conditions létales atteintes au moment de la sortie	dt=0	P=0,5	fermé	bloqué fermé	autres occupants aile 1 confinés
13	40	ouvrir	décision de sortir	autres occupants aile 1	autres occupants aile 1 dans couloir aile 1	dt=[15;90]"	P=1	fermé	ouvert	autres occupants aile 1 dans hall
14	41	ouvrir	décision de sortir	autres occupants aile 1	autres occupants aile 1 dans hall	dt=[15;30]"	P=1	fermé	ouvert	autres occupants aile 1 à l'extérieur du système

TABLEAU 16 : PROCESSUS D'ACTION DE L'APPLICATION PRATIQUE – DÉPLACEMENTS DES OCCUPANTS DES AUTRES STUDIOS DE L'AILE N°1

Occupants des autres studios de l'aile n°2

Les occupants des studios de l'aile n°2 ont rigoureusement le même comportement que ceux de l'aile n°1 à ceci près qu'ils évacuent par le couloir de l'aile n°2 et non celui de l'aile n°1.

N° PA	Événement analysé - action			Système acteur				Système cible		Événements terminaux
	Vanne	Type d'action	Représentation de l'action ou de la vanne	Entité source	Événement initiateur	Délai	Fréquence d'occurrence	État initial de la vanne	État final de la vanne	
15	45	ouvrir	décision de sortir	autres occupants aile 2	autres occupants aile 2 alertés	dt=[30;60]"	P=1	fermé	ouvert	autres occupants aile 2 dans couloir aile 2
16	45	ouvrir	décision de sortir	autres occupants aile 2	/	dt=[0;40]"	P=1	fermé	ouvert	autres occupants aile 2 dans couloir aile 2
17	45	fermer et bloquer	décision de se confiner	volume de gaz couloir aile 2	conditions létales atteintes au moment de la sortie	dt=0	P=0,5	fermé	bloqué fermé	autres occupants aile 2 confinés
18	44	ouvrir	décision de sortir	autres occupants aile 2	autres occupants aile 2 dans couloir aile 2	dt=[15;90]"	P=1	fermé	ouvert	autres occupants aile 2 dans hall
19	43	ouvrir	décision de sortir	autres occupants aile 2	autres occupants aile 2 dans hall	dt=[15;30]"	P=1	fermé	ouvert	autres occupants aile 2 à l'extérieur du système

TABLEAU 17 : PROCESSUS D'ACTION DE L'APPLICATION PRATIQUE – DÉPLACEMENTS DES OCCUPANTS DES AUTRES STUDIOS DE L'AILE N°2

Secours extérieurs

À partir du moment où ils sont alertés, les secours arrivent sur les lieux entre 10 et 15 minutes (cf. PA n°20 dans le Tableau 18).

N° PA	Événement analysé - action			Système acteur				Système cible		Événements terminaux
	Vanne	Type d'action	Représentation de l'action ou de la vanne	Entité source	Événement initiateur	Délai	Fréquence d'occurrence	État initial de la vanne	État final de la vanne	
20	46	ouvrir	décision d'intervenir	équipe de secours extérieurs	secours extérieurs alertés	dt=[10;15]"	P=1	fermé	ouvert	équipe de secours sur site

TABLEAU 18 : PROCESSUS D'ACTION DE L'APPLICATION PRATIQUE – DÉPLACEMENTS DE L'ÉQUIPE DE SECOURS

III.D.c) Détection

L'occupant du studio sinistré détecte le premier foyer dès le début du scénario dans 70% des scénarios simulés (cf. PA n°21 dans le Tableau 19). Cette valeur de 70% représente la disponibilité de l'occupant pour détecter le foyer, qui correspond ici à un état d'éveil. Autrement dit, dans cette application, un occupant endormi est incapable de détecter le danger et cette situation se présente dans 30% des scénarios.

Le détecteur servant à commander les vantaux détecte la déplétion d'oxygène dans la zone haute du couloir de l'aile n°1. Lorsque la fraction massique d'oxygène descend sous un certain seuil, le détecteur, s'il est disponible, s'active (cf. PA n°21 du Tableau 19). Le seuil de détection varie selon les scénarios autour de 0,224 ±5%. Toutefois, dans 10% des scénarios, le détecteur est initialement défaillant (cf. PA n°22 du Tableau 19) et sera donc indisponible pour la détection (la vanne V26 est bloquée). Ce détecteur n'existe que dans les stratégies B, C et D, aussi la fréquence d'occurrence de cet événement est nulle pour la stratégie A.

Un panache de fumée est considéré comme sortant d'une fenêtre si la hauteur de fumée dans le local est plus basse que le linteau de la fenêtre ouverte. À partir de cet instant, le passant le détecte toujours (cf. PA n°24 du Tableau 19).

N° PA	Événement analysé - action			Système acteur				Système cible		Événements terminaux
	Vanne	Type d'action	Représentation de l'action ou de la vanne	Entité source	Événement initiateur	Délai (dt)	Fréquence d'occurrence (P)	État initial de la vanne	État final de la vanne	
21	25	ouvrir	déteçtabilité du premier foyer	premier foyer	-	dt=0	P=0,7	fermé	ouvert	occupant st. sinistré alerté
22	26	ouvrir	déteçtabilité de la fumée	volume de gaz couloir aile 1	seuil de détection dépassé – fraction massique de dioxygène trop basse	dt=0	Stratégie A : P=0 Stratégies B, C ou D : P=1	fermé	ouvert	détecteur commande vantaux alerté
23	26	bloquer	défaillance	détecteur commande vantaux	/	dt=0	P=0,1	fermé	bloqué fermé	détecteur commande vantaux défaillant
24	27	ouvrir	visibilité d'un panache	panache fumée	une fenêtre ouverte et hauteur libre < linteau	dt=0	P=1	fermé	ouvert	passant alerté

TABLEAU 19 : PROCESSUS D'ACTION DE L'APPLICATION PRATIQUE – DÉTECTION

III.D.d) Propagation de l'alerte

Dans 80% des scénarios, l'occupant n°1 crie « au feu » peu après (5 secondes) être entré dans le couloir (cf. PA n°25 dans le Tableau 20). Ainsi, il alerte les occupants des studios voisins. Toutefois, ces occupants ne sont pas toujours en mesure d'entendre le cri poussé (cf. PA n°26 et n°27 bloquant les vannes V28 et/ou V30). Nous avons considéré que les occupants entendent le cri d'alerte dans 60% des cas, sauf si la circulation est recoupée⁵⁶. Dans ce dernier cas (stratégies B et C uniquement), nous avons admis que les portes de recoupement isolent totalement du bruit (cf. PA 27).

Dans la moitié des scénarios, l'occupant du studio sinistré déclenche l'alarme coup de poing entre 10 et 25 secondes après être sorti de l'aile (cf. PA n°28 dans le Tableau 20). L'alarme fonctionne toujours (absence de PA bloquant la vanne V29). Lorsqu'elle sonne, elle alerte sans délai tous les occupants de l'étage (cf. PA n°30 et n°31 dans le Tableau 20) et le concierge (cf. PA n°32 dans le Tableau 20).

Lorsqu'il sort de l'étage, l'occupant alerte le concierge après un délai compris entre 1 et 5 minutes (cf. PA n°39 dans le Tableau 20). Ce délai correspond à la descente des escaliers ou à l'attente d'un ascenseur. Le concierge est toujours à son poste et toujours apte à être alerté (absence de blocage des vannes V31 et V34). Le concierge, lorsqu'il est alerté (que ce par l'intermédiaire de l'alarme ou de l'occupant), prévient toujours et sans délai le centre de secours (cf. PA n°33 dans le Tableau 20). Les secours peuvent également être alertés par le passant (cf. PA n°34 dans le Tableau 20), qui les alerte dans un délai compris entre 30 secondes et 15 minutes après avoir vu le panache de fumée. Ce délai assez large représente la difficulté de prédire la présence et le comportement du passant.

N° PA	Événement analysé - action			Système acteur				Système cible		Événements terminaux
	Vanne	Type d'action	Représentation de l'action ou de la vanne	Entité source	Événement initiateur	Délai (dt)	Fréquence d'occurrence (P)	État initial de la vanne	État final de la vanne	
25	28, 30	ouvrir	cri "au feu"	occupant st. sinistré	occupant st. sinistré dans couloir aile 1	dt=5"	P=0,8	fermé	ouvert	autres occupants aile 1 alertés + autres occupants aile 2 alertés
26	28	bloquer	cri inaudible	autres occupants aile 1	-	dt=0	P=0,4	fermé	bloqué fermé	occupants aile 1 incapables d'entendre le cri d'alerte
27	30	bloquer	cri inaudible	autres occupants aile 2	-	dt=0	Stratégies A et D : P=0,4 Stratégies B et C : P=1	fermé	bloqué fermé	occupants aile 2 incapables d'entendre le cri d'alerte
28	29	ouvrir	bouton poussoir de l'alarme	occupant st. sinistré	occupant st. sinistré dans hall	dt=[10 ;25]"	P=0,5	fermé	ouvert	alarme déclenchée
39	31	ouvrir	communication interhumaine	occupant st. sinistré	occupant st. sinistré à l'extérieur du système	dt=[1;5]'	P=1	fermé	ouvert	concierge alerté
30	32	ouvrir	audibilité de l'alarme	alarme coup de poing	alarme déclenchée	dt=1	P=1	fermé	ouvert	autres occupants aile 1 alertés

⁵⁶ Les événements décrits par le PA n°26 et le PA n°27 étant indépendants, il est possible que dans le même scénario, les occupants d'une aile entendent le cri et non les autres

N° PA	Événement analysé - action			Système acteur				Système cible		Événements terminaux
	Vanne	Type d'action	Représentation de l'action ou de la vanne	Entité source	Événement initiateur	Délai (dt)	Fréquence d'occurrence (P)	État initial de la vanne	État final de la vanne	
31	33	ouvrir	audibilité de l'alarme	alarme coup de poing	alarme déclenchée	dt=0	P=1	fermé	ouvert	autres occupants aile 2 alertés
32	34	ouvrir	audibilité de l'alarme	alarme coup de poing	alarme déclenchée	dt=0	P=1	fermé	ouvert	concierge alerté
33	35	ouvrir	télécommunication	concierge	concierge alerté	dt=0	P=1	fermé	ouvert	secours extérieurs alertés
34	36	ouvrir	télécommunication	passant	passant alerté	dt=[0.5;15]'	P=1	fermé	ouvert	secours extérieurs alertés

TABLEAU 20 : PROCESSUS D'ACTION DE L'APPLICATION PRATIQUE – PROPAGATION DE L'ALARME

III.D.e) Activité des foyers

L'embrasement généralisé survient si la température des gaz atteint une température critique, comprise, selon les scénarios, entre 500 °C et 600 °C. Lorsque cet événement survient, le premier foyer s'arrête définitivement (cf. PA n°35 dans le Tableau 21) et le second démarre avec un débit calorifique initial égal à celui du premier foyer (cf. PA n°36 dans le Tableau 21).

Par ailleurs, les foyers peuvent s'éteindre. La puissance de feu décline alors rapidement et totalement. Deux cas sont distingués. Dans le premier cas, les foyers s'arrêtent spontanément parce que la totalité du contenu combustible a été consommé (cf. PA n°37 et n°38 dans le Tableau 21). Pour connaître ce contenu, nous avons considéré que chaque studio touché par l'incendie apportait 500 kg de combustible dit équivalent bois⁵⁷ (cf. remarque ci-dessous). Dans le second cas, les foyers s'arrêtent par l'action des secours extérieurs. Si le foyer s'arrête, quelle qu'en soit la raison, le scénario prend fin (cf. case de couleur orange dans le Tableau 21).

N° PA	Événement analysé - action			Système acteur				Système cible		Événements terminaux
	Vanne	Type d'action	Représentation de l'action ou de la vanne	Entité source	Événement initiateur	Délai (dt)	Fréquence d'occurrence (P)	État initial de la vanne	État final de la vanne	
35	1;2	fermer et bloquer	embrasement généralisé (flashover)	volume de gaz st. sinistré	température de flashover atteinte $T_{zh} > T_{flashover}$	dt=0	P=1	ouvert	bloqué fermé	disparition du premier foyer (flashover)
36	3;4	ouvrir	embrasement généralisé (flashover)	volume de gaz st. sinistré	disparition du premier foyer - flashover	dt=0	P=1	fermé	ouvert	apparition du second foyer (flashover)
37	1;2;3;4	fermer et bloquer	combustible disponible	premier foyer	masse pyrolysée > masse disponible *	dt=0	P=1	fermé ou ouvert	bloqué fermé	extinction par épuisement
38	1;2;3;4	fermer et bloquer	extinction manuelle	équipe de secours extérieurs	équipe de secours sur site	dt=[5;6]	P=1	ouvert ou fermé	bloqué fermé	extinction par l'équipe de secours

FIN de scénario

TABLEAU 21 : PROCESSUS D'ACTION DE L'APPLICATION PRATIQUE – ACTIVITÉ DES FOYERS

Remarque :

Il n'existe dans le Tableau 21 aucun processus d'action traduisant l'augmentation de la quantité de combustible disponible cas d'extension de l'incendie aux autres studios.

⁵⁷ C'est-à-dire que l'enthalpie de combustion retenue est celle du bois (environ $17.10^6 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$), ce qui correspond à une énergie totale libérée de $8,5.10^3 \text{ MJ}$

Cette absence s'explique par le fait que cette augmentation n'est que la conséquence d'un événement (ici la ruine de la porte) et non un événement en soi. Il demeure néanmoins important d'ajuster ces paramètres au cours du temps et il reviendra à l'expert en sécurité incendie de construire convenablement les réseaux de Petri pour y parvenir.

III.D.f) Actionnements de vantaux

Seuls les vantaux cités ci-après sont actionnés par des personnes ou par un équipement de sécurité. Initialement, toutes les portes des studios sont fermées et les portes de recouplement sont ouvertes. De plus, les fenêtres sont toujours initialement fermées, à l'exception de la fenêtre du studio sinistré dont l'état initial varie selon les scénarios. Cette fenêtre peut être soit initialement ouverte (83% des scénarios), soit initialement demi-ouverte (13% des scénarios), soit initialement fermée (4% des scénarios). Les fréquences de répartition entre les différents états sont issues des informations obtenues auprès de la gardienne, interrogée sur les habitudes des occupants.

Porte du studio sinistré

La porte du studio sinistré est ouverte et refermée par l'occupant du studio sinistré lors de son passage. Cet occupant, s'il ouvre évidemment toujours la porte pour sortir (cf. PA n°39 du Tableau 22), ne la referme que dans 10% des scénarios (cf. PA n°40 du Tableau 22).

Portes du système de recouplement

Si la mesure de recouplement existe dans la stratégie (soit uniquement dans les stratégies B et D), les portes de recouplement sont refermées dès que le détecteur qui les contrôle est activé. Leur taux de disponibilité est de 100% (cf. PA n°41 et n°42 du Tableau 22).

Fenêtres du système de ventilation

Si le système de ventilation existe dans la stratégie (soit uniquement dans les stratégies C et D), les fenêtres des ailes s'ouvrent dès que le détecteur qui les contrôle est activé. Leur taux de disponibilité est de 100% (cf. PA n°43 et n°44 du Tableau 22).

N° PA	Événement analysé - action			Système acteur				Système cible		Événements terminaux
	Vanne	Type d'action	Représentation de l'action ou de la vanne	Entité source	Événement initiateur	Délai (dt)	Fréquence d'occurrence (P)	État initial de la vanne	État final de la vanne	
39	7	ouvrir	porte st. sinistré	occupant st. sinistré	occupant st. sinistré dans couloir aile 1	dt=0	P=1	fermé	ouvert	porte st. sinistré ouverte
40	7	fermer	porte st. sinistré	occupant st. sinistré	porte st. sinistré ouverte	dt=0	P=0.1	ouvert	fermé	porte st. sinistré fermée
41	13,19	fermer	portes recouplement 1 et 2 (compartim.)	détecteur commande vantaux	détecteur commande vantaux alerté	dt=0	stratégies B et D : P=1 stratégies A et C : P=0	ouvert ou fermé	fermé	porte recouplement 1 fermée + porte recouplement 2 fermée
42	14, 23	ouvrir	fenêtre 1 couloir aile 1 et 2 (ventilation)	détecteur commande vantaux	détecteur commande vantaux alerté	dt=0	stratégies A et D : P=1 stratégies B et D : P=0	ouvert	fermé	fenêtre aile 1 ouverte + fenêtre 1 aile 2 ouverte

TABLEAU 22 : PROCESSUS D'ACTION DE L'APPLICATION PRATIQUE – ACTIONNEMENT DES VANTAUX

III.D.g) Ruine de vantaux

Tous les ouvrants peuvent être agressés thermiquement jusqu'à leur destruction. Deux modèles de destruction des ouvrants sont définis, l'un pour les portes, l'autre pour les vitrages.

Portes (cf. tous les PA du Tableau 23)

Le modèle de ruine de porte est basé sur une comparaison de l'énergie totale accumulée dans la porte depuis le début du scénario avec l'énergie thermique à laquelle cette porte résiste dans un four d'essai lors d'un test normalisé. Cette dernière énergie, appelée énergie critique, se calcule par l'intégrale du flux incident sur la durée de résistance en four. La durée de résistance retenue varie selon les scénarios et selon les portes. Elle est comprise entre 5 et 25 minutes pour une porte de studio et entre 15 et 45 minutes pour une porte de recoupement ou pour la porte palière.

Les PA n°46, n°47 et n°48 correspondent respectivement aux E.N.S. n°4, n°5 et n°6. En outre, les PA n°46 et n°47, s'ils surviennent lorsque les occupants sont présents dans les studios (c'est-à-dire avant l'occurrence des PA n°10 et n°15), correspondent respectivement aux E.N.S. n°2 et n°3.

N° PA	Événement analysé - action			Système acteur				Système cible		Événements terminaux
	Vanne	Type d'action	Représentation de l'action ou de la vanne	Entité source	Événement initiateur	Délai (dt)	Fréquence d'occurrence (P)	État initial de la vanne	État final de la vanne	
43	7	ouvrir et bloquer	porte st. sinistré	porte st. sinistré	énergie accumulée > énergie critique	dt=0	P=1	ouvert ou fermé	bloqué ouvert	porte st. sinistré ruinée
44	13	ouvrir et bloquer	porte recoupement 1	porte recoupement 1	énergie accumulée > énergie critique	dt=0	P=1	ouvert ou fermé	bloqué ouvert	porte recoupement 1 ruinée
45	19	ouvrir et bloquer	porte recoupement 2	porte recoupement 2	énergie accumulée > énergie critique	dt=0	P=1	ouvert ou fermé	bloqué ouvert	porte recoupement 2 ruinée
46	12	ouvrir et bloquer	portes autres st. aile 1	portes autres st. aile 1	énergie accumulée > énergie critique	dt=0	P=1	ouvert	bloqué ouvert	portes autres st. aile 1 ruinées + augmentation de la masse de combustible
47	22	ouvrir et bloquer	portes autres st. aile 2	portes autres st. aile 2	énergie accumulée > énergie critique	dt=0	P=1	ouvert	bloqué ouvert	portes autres st. aile 2 ruinées + augmentation de la masse de combustible
48	17	ouvrir et bloquer	porte palière	porte palière	énergie accumulée > énergie critique	dt=0	P=1	ouvert	bloqué ouvert	porte palière ruinée

TABLEAU 23 : PROCESSUS D'ACTION DE L'APPLICATION PRATIQUE – RUINE DES PORTES

Remarque :

Si la porte d'un studio se ruine, alors nous considérons qu'il est touché par le feu, et 500 kg de masse combustible sont ajoutés au foyer (cf. PA n°46 et 47 du Tableau 23). Autrement dit, ruiner les portes de studio conduit à augmenter la durée de l'incendie.

Fenêtres (cf. tous les PA du Tableau 24)

Le vitrage se ruine lorsque la température du gaz en zone chaude est comprise entre 300°C et 400°C⁵⁸. Pour un scénario, la valeur est tirée aléatoirement dans l'intervalle de température précédent.

⁵⁸ Les valeurs ont été retenues du retour d'expérience de l'incendie du 12 mars 2007. Elles peuvent toutefois sembler un peu basses.

N° PA	Événement analysé - action			Système acteur				Système cible		Événements terminaux
	Vanne	Type d'action	Représentation de l'action ou de la vanne	Entité source	Événement initiateur	Délai (dt)	Fréquence d'occurrence (P)	État initial de la vanne	État final de la vanne	
49	8	ouvrir et bloquer	ruine ventail fenêtre st. sinistré	volume de gaz st. sinistré	Température > [300;400°C]	dt=0	P=1	ouvert, fermé ou semi-ouvert	bloqué ouvert	vitrage fenêtre st. sinistré brisé
50	14	ouvrir et bloquer	ruine ventail fenêtre couloir aile 1	volume de gaz couloir aile 1	Température > [300;400°C]	dt=0	P=1	ouvert ou fermé	bloqué ouvert	vitrage fenêtre aile 1 brisé
51	23	ouvrir et bloquer	ruine ventail fenêtre 1 couloir aile 2	volume de gaz couloir aile 2	Température > [300;400°C]	dt=0	P=1	ouvert ou fermé	bloqué ouvert	vitrage fenêtre 1 aile 2 brisé
52	24	ouvrir et bloquer	ventail fenêtre 2 couloir aile 2	volume de gaz couloir aile 2	Température > [300;400°C]	dt=0	P=1	ouvert ou fermé	bloqué ouvert	vitrage fenêtre 2 aile 2 brisé

TABLEAU 24 : PROCESSUS D'ACTION DE L'APPLICATION PRATIQUE – RUINE DES FENÊTRES

III.E Vérification de la trame

III.E.a) Identification des interactions entre événements discrets

Comme indiqué dans le troisième chapitre, il existe deux types d'interactions entre processus : des enchaînements d'une part signifiant que l'occurrence d'un processus d'action dit initiateur entraîne (ou peut entraîner) la réalisation d'un processus d'action dit initié ; des empêchements d'autre part signifiant que l'occurrence d'un processus d'action dit inhibiteur empêche la réalisation d'un processus d'action dit inhibé.

Ces deux types d'interactions peuvent être représentés soit sous forme matricielle, soit sous forme arborescente. Ces deux représentations, de contenu identique, sont complémentaires. La première est mieux adaptée lorsque les événements sont nombreux ; la seconde est beaucoup plus visuelle et pédagogique. En outre, la seconde représentation permet l'ajout d'éventuelles contraintes de séquençage. Dans un premier temps, nous focaliserons sur la forme matricielle et, dans un deuxième temps, sous la forme arborescente.

Matrice d'interaction

Rappel :

Une matrice d'interaction est une matrice carré NxN, avec N le nombre de processus d'action, et donc d'événements (puisque un processus d'action représente un événement). Cette matrice se remplit ligne par ligne, en regardant pour chaque processus d'action en tête de ligne s'il peut engendrer ou inhiber la réalisation d'un ou de plusieurs processus d'action indiqué(s) en tête de colonne. S'il s'agit d'un engendrement, alors l'interaction est de type enchaînement de processus et le lien est matérialisé par la lettre I (comme initiation). S'il s'agit d'une inhibition, alors l'interaction est de type empêchement, et lien est matérialisé par la lettre B (comme blocage).

La Figure 75 représente les interactions entre les événements de l'application pratique. La lecture de cette figure permet les cinq affirmations suivantes.

Premièrement, les six premiers événements symbolisant les décès des occupants ont **un fort potentiel d'impact** sur les autres événements. En effet, ces six événements peuvent inhiber les nombreuses actions humaines imaginées dans cette application (jusqu'à sept événements inhibés en cas de décès de l'occupant du studio sinistré).

Deuxièmement, la défaillance des équipements du système technique de sécurité n'a qu'un **faible potentiel d'impact** sur les autres événements car seule la défaillance initiale du détecteur est considérée (PA n°23).

Troisièmement, les ruines de ventaux (PA n°43 à n°52), même s'ils sont très nombreux, n'ont qu'un **faible potentiel d'impact** sur les autres événements. En effet, ces ruines n'inhibent que peu d'événements, tout simplement car les mouvements de ventaux en dehors de ceux causés par la ruine sont peu nombreux dans cet exemple.

Quatrièmement, l'alerte des secours extérieurs (PA n°33) peut être initiée par les trois événements distincts suivants : l'alerte du concierge par l'occupant du studio sinistré (PA n°29), l'alerte du concierge par l'alarme (PA n°30) ou l'alerte du passant par le panache (PA n°32). Il existe donc une **forte redondance** menant à cet événement.

Cinquièmement et dernièrement, puisque les processus d'action tels que le décès (cf. PA n°1 à n°6) ou les bris de ventaux (cf. PA n°43 à n°52) sont des événements déclenchés par les conditions physiques, **ils peuvent survenir (ou non) à des instants très variables d'un scénario à l'autre**. Seules les simulations permettent de constater comment ils vont s'inscrire dans la séquence d'événements.

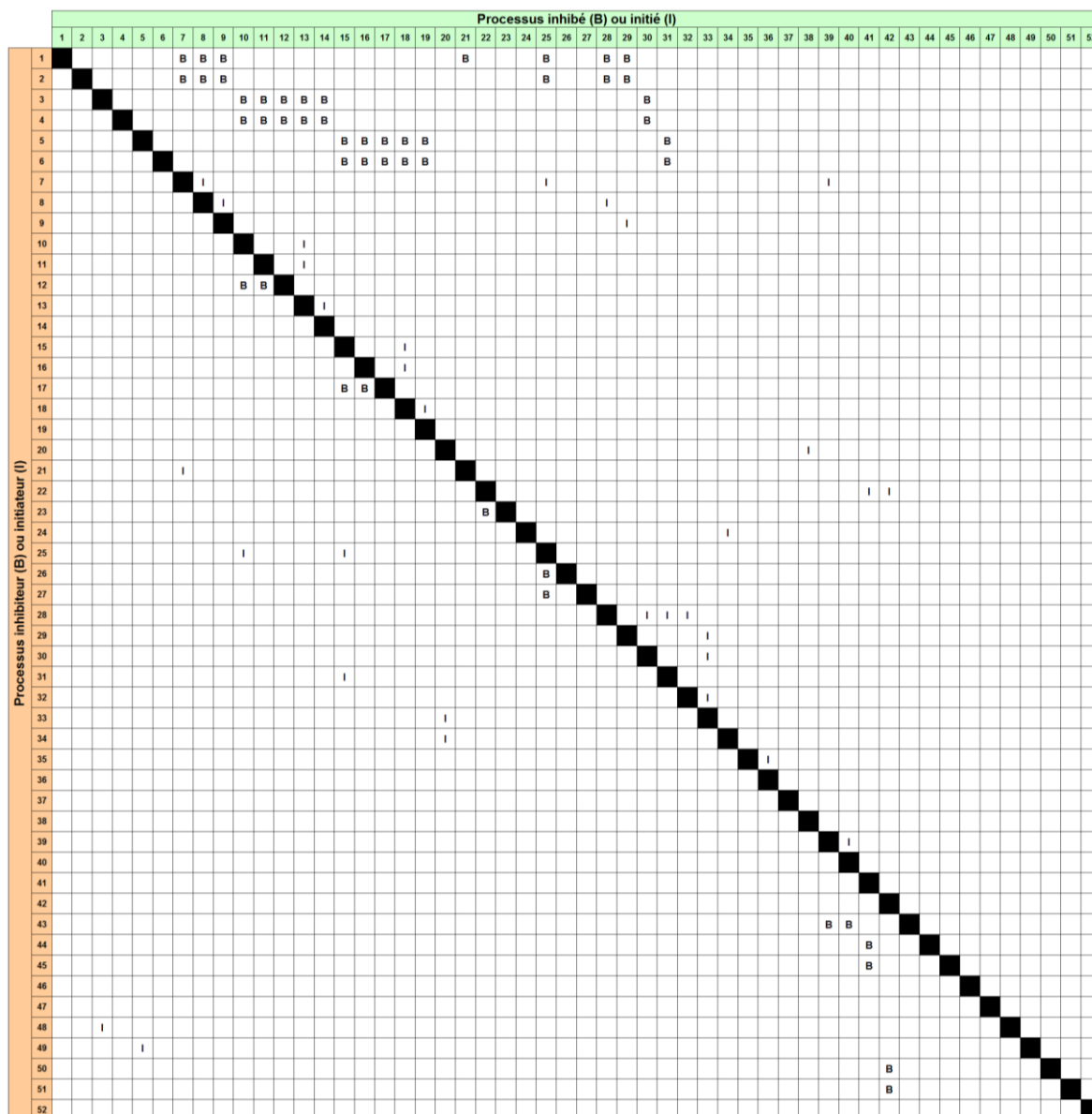


FIGURE 75 : MATRICE D'INTERACTIONS ENTRE PROCESSUS D'ACTION DE L'APPLICATION PRATIQUE

De manière plus générale, les arbres d'interactions suivants facilitent la lecture et la vérification du scénario.

Arbres d'interaction

Rappel :

Ces arbres permettent de visualiser les séquences événementielles en représentant les interactions entre processus d'action par un lien bleu si l'interaction est un enchaînement, et par un éclair rouge si l'interaction est un empêchement. La logique pour construire un arbre peut être déductive ou inductive. Dans le premier cas, l'arbre débute par un événement et l'on cherche à dérouler l'ensemble des séquences possibles à partir de cet événement. Dans le second cas, l'arbre termine par un événement et l'on cherche à remonter l'ensemble des séquences menant à cet événement. Dans tous les cas, ces arbres sont probabilisés et temporisés, ce qui permet à la fois une meilleure appréciation des séquences (p. ex. : de leur potentialité de réalisation) et une vérification

de leur cohérence. Ce travail revient à vérifier, à chaque nœud de l'arbre, que les délais fixés ne mènent en aucun cas à des séquences événementielles impossibles.

La Figure 76 présente la légende utilisée dans les arbres.

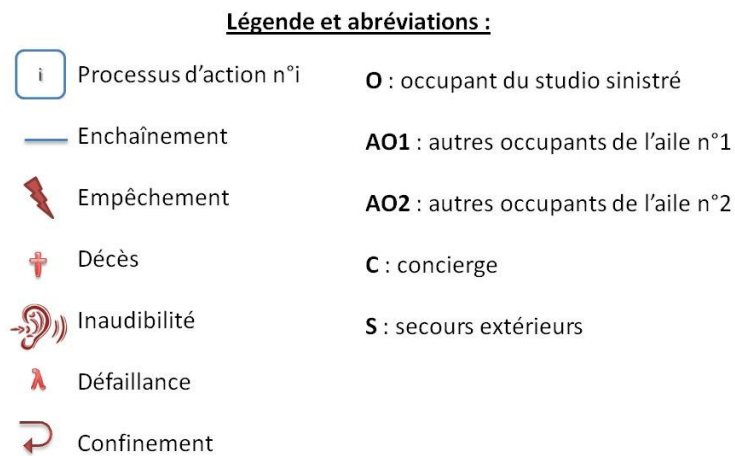


FIGURE 76 : LÉGENDE ET ABRÉVIATIONS DES ARBRES D'INTERACTIONS

Arbres déductifs

Parmi les arbres déductifs pouvant être construits pour l'application pratique, nous n'avons représentés en Figure 77, Figure 78 et Figure 79 que ceux débutant par la détection. Ce choix a été guidé par la constatation que, dans cette application, la plupart des actions sont initiées par de la détection. Cette constatation s'explique par la représentation très simple du comportement (notamment des personnes) **avant** la prise de conscience du danger (p. ex. : attendre dans son studio, sortir du bâtiment...).

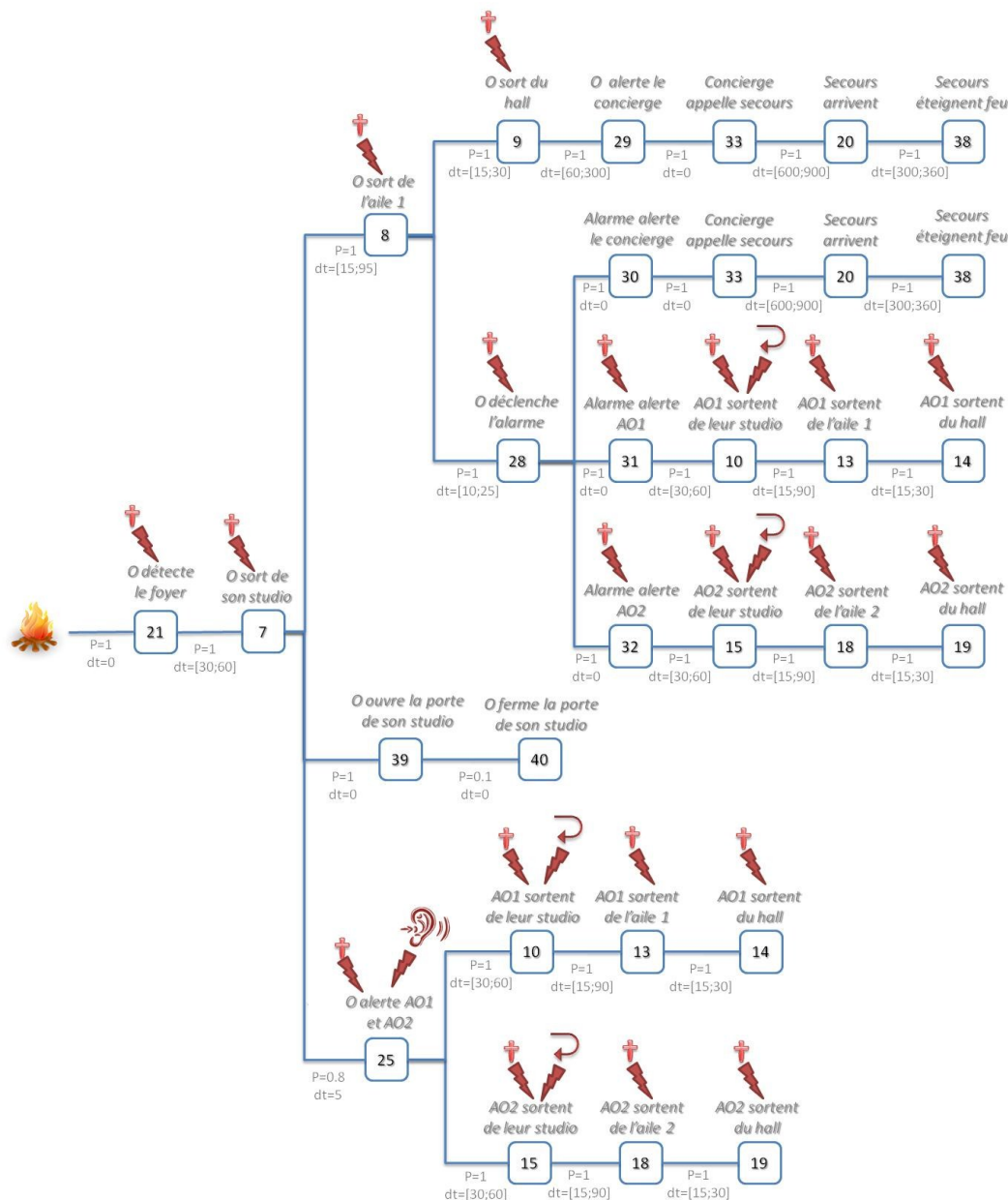


FIGURE 77 : ARBRE D'INTERACTION DÉBUTANT PAR LA DÉTECTION PAR L'OCCUPANT

La Figure 77, initiée par la détection du foyer par l'occupant du studio sinistré, correspond à l'arbre le plus conséquent des trois. Cette importance illustre le rôle capital que les modélisateurs ont voulu donner à l'occupant dans le déroulement de ce sinistre. En effet, il est potentiellement à l'origine de nombreuses actions, et chacune d'entre elles engendrent potentiellement des enchaînements d'événements longs et ramifiés. Les enchaînements, représentés par des traits bleus dans la Figure 77, traduisent des phénomènes de propagation de l'alerte, d'évacuation et d'intervention des secours. Ces enchaînements peuvent être interrompus par des événements inhibiteurs, symbolisés par des éclairs rouges dans la Figure 77. Dans cette figure, les interruptions de branches sont nombreuses et elles sont principalement dues à des décès, qui constituent dans cette application, une véritable épée de Damoclès (cf. le symbole ⚡ au-dessus des éclairs rouges de la Figure 77). Dans une moindre mesure, elles sont dues à du confinement (cf. le symbole ↻ au-dessus des éclairs rouges de la Figure 77) ou une mauvaise entente du cri d'alerte (cf. le symbole 👂 au-dessus des éclairs rouges de la Figure 77). Ces nombreuses interruptions mettent l'accent sur la fiabilité toute

relative que les modélisateurs ont voulu donner aux personnes pour accomplir des actions de sécurité. Cependant, en considérant ici que la fiabilité d'une séquence se définit comme sa propension à ne pas être interrompue, appréhender correctement cette fiabilité requiert non seulement de connaître les événements inhibiteurs de cette séquence (c'est-à-dire à la fois le nombre de PA inhibiteurs impactant cette enchaînement et la facilité de les déclencher) mais également les fréquences d'occurrence⁵⁹ des enchaînements d'événements qui la constituent. Par exemple, dans cette application, les secours extérieurs sont très fiables. En effet, ils éteignent toujours le feu s'ils sont alertés (toutes les fréquences d'occurrence concernant leurs actions valent 1 – cf. PA n°33, n°20 et n°38) et en plus, leur décès n'est pas considéré (absence d'éclair rouge sur les PA n°33, n°20 et n°38).

L'analyse des résultats de simulations permettra évidemment d'apporter des éléments éclairant cette première analyse.

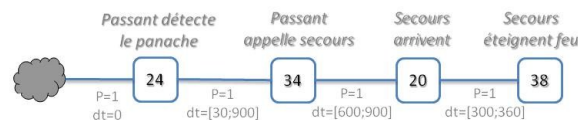


FIGURE 78 : ARBRE D'INTERACTION DÉBUTANT PAR LA DÉTECTION PAR LE PASSANT

La Figure 78 correspond à l'arbre initié par la détection du panache de fumée par le passant. Cet arbre est court puisque le passant et les secours ont un rôle très limité, celui d'alerter les secours pour le passant, et celui d'éteindre le feu pour les secours. Les événements nécessaires pour représenter ces rôles sont donc peu nombreux. De plus, sachant qu'aucune interruption de branche ne menace les enchaînements et qu'en outre, toutes les fréquences d'occurrence sont égales à un, cette séquence est très fiable. En d'autre termes, il suffit que, dans un scénario, le panache soit visible et les secours n'aient pas déjà été alertés (p. ex. : par le concierge) pour que cette séquence se déploie jusqu'au bout (les secours éteignent le feu).

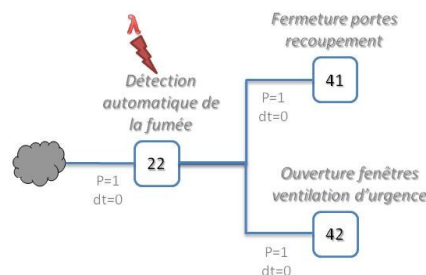


FIGURE 79 : ARBRE D'INTERACTION DÉBUTANT PAR LA DÉTECTION PAR LE DÉTECTEUR

La Figure 79, quant à elle, est initiée par la détection automatique. Cet arbre correspond aux séquences événementielles relatives aux systèmes de recoupement et de ventilation de la CHC. La fiabilité de ces systèmes est directement corrélée avec la fiabilité du détecteur puisque la défaillance de ce détecteur est la seule possibilité d'interruption des enchaînements d'événements (cf. le symbole  au-dessus de l'éclair rouge de la Figure 79). Autrement dit, si le

⁵⁹ Ces fréquences sont repérées en gris sous les branches de la Figure 77, en même temps que les délais devant s'écouler avant que l'événement ne se réalise.

détecteur fonctionne et que le seuil de détection est atteint, les branches de l'arbre se déploient jusqu'au bout (le compartimentage et la ventilation sont activés).

Arbres inductifs

Parmi les arbres inductifs pouvant être construits pour l'application pratique, nous n'avons représenté que ceux s'achevant par la sortie des autres occupants de l'étage étudié et par l'extinction du feu par des secours. En effet, seuls les arbres menant à ces deux événements présentent des redondances.

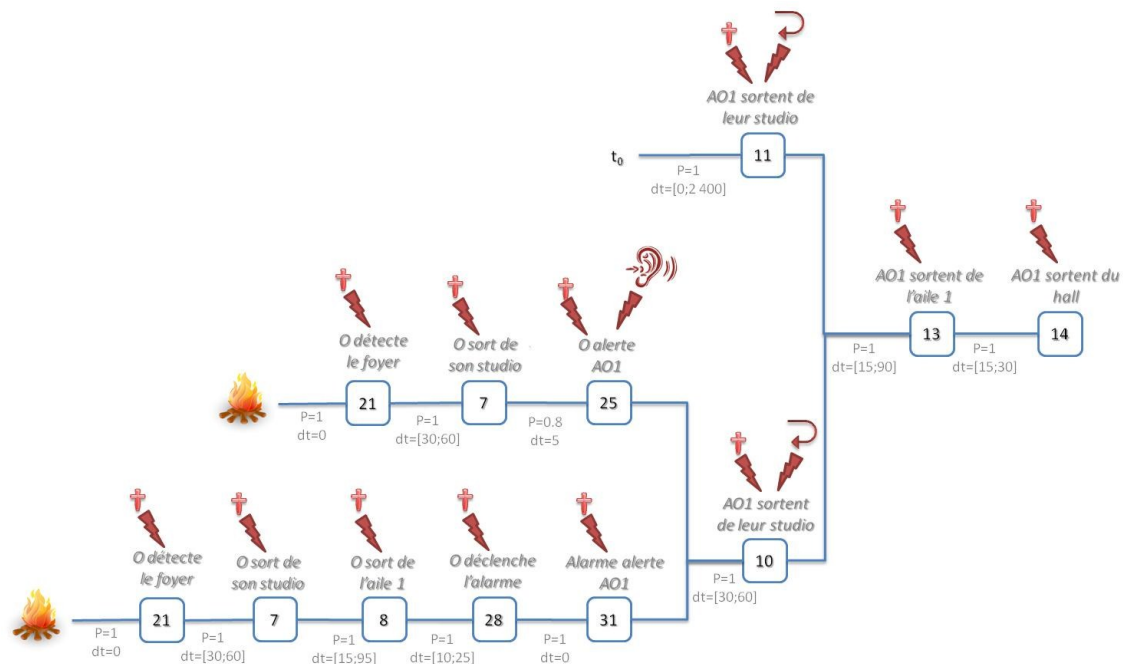


FIGURE 80 : ARBRE D'INTERACTION TERMINANT PAR LA SORTIE DES AUTRES OCCUPANTS DE L'AILE 1 DE L'ÉTAGE ÉTUDIÉ

La Figure 80 représente les différentes séquences pouvant mener à la sortie des autres occupants de l'aile n°1 (celui représentant les autres occupants de l'aile n°2 est identique, à l'exception évidemment des numéros de PA). Tout d'abord, il est possible de constater que les occupants sont vulnérables tout au long de l'arbre, et ce quelle que soit la séquence déroulée. Ensuite, trois séquences menant à la sortie de l'étage peuvent être distinguées : soit les occupants sortent, tout en ignorant le présence de danger (séquence 11-13-14) ; soit ils sortent après avoir entendu les cris de l'occupant du studio sinistré (séquence 21-7-25-10-13-14) ; soit ils sortent après avoir entendu l'alarme (séquence 21-7-8-28-31-10-13-14). Évidemment, il suffit que l'une de ces trois séquences se déroule dans un scénario pour que les occupants soient sortis. En conclusion, au vue de la redondance constatée et des probabilités considérées, il est possible d'affirmer que dans cette application, les occupants sortent souvent dans les circulations pour évacuer de l'étage.

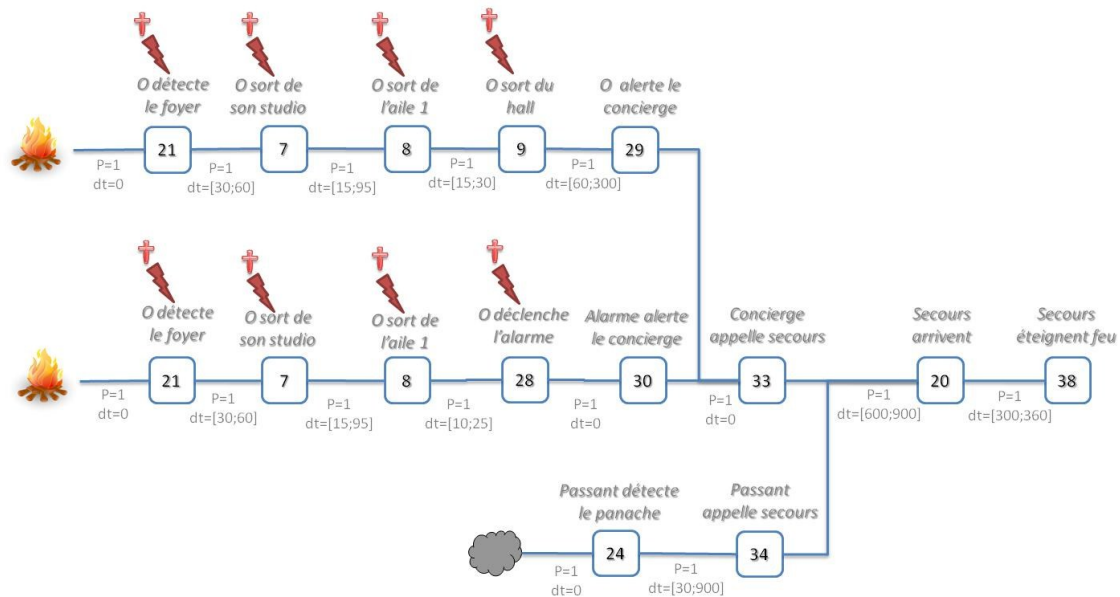


FIGURE 81 : ARBRE D'INTERACTION TERMINANT PAR L'EXTINCTION DU FEU PAR LES SECOURS

La Figure 81 représente les différentes séquences pouvant mener à l'extinction du feu par les secours. Là également, il est possible de distinguer trois séquences menant à cet événement étudié : soit les secours interviennent après avoir été alertés par le concierge, lui-même alerté par l'occupant (cf. la branche du haut); soit les secours interviennent après avoir été alertés par le concierge, lui-même alerté par l'alarme (cf. la branche du milieu); soit les secours interviennent après avoir été alertés par le passant (cf. la branche du bas). En outre, seule les séquences s'appuyant sur l'occupant du studio sinistré peuvent être interrompues. Ainsi, il est possible de conclure qu'en raison d'une forte redondance, de l'existence d'une branche sans interruption (cf. la branche du bas) et des fortes probabilités d'enchaînement, les secours éteignent souvent le feu dans cette application (sauf bien sûr, si le feu s'est déjà éteint spontanément).

III.E.b) Expression des contraintes de séquençage

Rappel :

Une fois les arbres construits, il convient d'y rechercher d'éventuelles incompatibilités séquentielles. Pour identifier ces incompatibilités, il faut s'arrêter à chaque nœud des arbres et se demander si les événements des différentes branches :

- peuvent avoir lieu dans le même scénario (cas d'une porte OU au niveau du nœud) ;
- peuvent avoir lieu en même temps ou à défaut, lesquels doivent avoir lieu en premiers (cas d'une porte ET au niveau du nœud).

Si des incompatibilités existent, il est nécessaire de vérifier si les délais posés empêchent ces incompatibilités de devenir effectives lors d'un scénario et à défaut, d'ajouter des contraintes de séquençage explicites.

Dans cette application pratique, deux incompatibilités ont été identifiées et les deux sont liées à la Figure 77.

Premièrement, l'occupant du studio sinistré n'a pas le droit d'ouvrir (cf. PA n°39) ou de fermer la porte de son studio (cf. PA n°40) après être sorti de l'aile (cf. PA n°8). En d'autres termes, la branche de la Figure 77 partant vers PA 39 doit se terminer avant que la branche partant vers le

PA 8 ne débute. Cette incompatibilité est évitée par les délais fixés puisque les PA n° 39 et n° 40 surviennent en même temps que le PA n° 7; et que le PA n°8 survient au plus tôt 15 secondes après le PA n°7. Il existera donc, quel que soit le scénario, une synchronisation minimale de 15 secondes entre ces événements.

Deuxièmement, l'occupant du studio sinistré n'a pas le droit de déclencher l'alarme (cf. PA n°28) après être sorti du hall (cf. PA n°9). En d'autres termes, la branche de la Figure 77 partant vers le PA 28 doit avoir commencé avant celle partant vers le PA n°9. Cette incompatibilité n'est pas évitée par les délais fixés puisque les intervalles [10 ; 25] et [15 ; 30] se chevauchent sur l'intersection [15 ; 25]. Il est donc nécessaire de contraindre ces intervalles pour que ces événements surviennent systématiquement dans l'ordre voulu. La contrainte de séquençage suivante est retenue : **l'occupant du studio sinistré déclenche toujours l'alarme 5 secondes avant de sortir**, c'est-à-dire que dans tous les scénarios, le délai du PA n°9 vaut 5 secondes de plus que celui du PA n°28.

IV. TRADUCTION DE LA TRAME EN RÉSEAUX DE PETRI ET SIMULATIONS

IV.A Réseaux de Petri générés

Après l'application de la démarche de traduction définie au quatrième chapitre, 25 réseaux de Petri élémentaires (RDPE) sont construits. Les 25 objets correspondants à ces RDPE sont listés dans le Tableau 22. Parmi ces RDPE, certains diffèrent uniquement par la valeur initiale de leurs variables. Ils appartiennent donc à une même classe d'objets et sont repérés dans le Tableau 22 par un même numéro entre parenthèses. Enfin, les indices K_i indiqués permettent de repérer les objets.

Objet - RDPE	Indice	Objet - RDPE	Indice
Porte du studio sinistré	k_1	(4) Parois du couloir de l'aile n°1	k_{14}
Porte-fenêtre du studio sinistré	k_2	(4) Parois du couloir de l'aile n°2	k_{15}
(1) Fenêtre n°1 du couloir de l'aile n°1	k_3	(4) Parois du hall	k_{16}
(1) Fenêtre du couloir de l'aile n°2	k_4	Extérieur	k_{17}
Fenêtre n°2 du couloir de l'aile n°1	k_5	Occupant du studio sinistré	k_{18}
(2) Porte des autres studios de l'aile n°1	k_6	Occupants des autres studios de l'aile n°1	k_{19}
(2) Porte des autres studios de l'aile n°2	k_7	Occupant des autres studios de l'aile n°2	k_{20}
Porte de la cage d'escalier	k_8	Concierge	k_{21}
(3) Porte de recoupement n°1	k_9	Secours extérieurs	k_{22}
(3) Porte de recoupement n°2	k_{10}	Passant	k_{23}
Premier foyer	k_{11}	Détecteur – commande ouvrant	k_{24}
Second foyer	k_{12}	Alarme coup-de-poing	k_{25}
(4) Parois du studio sinistré	k_{13}		

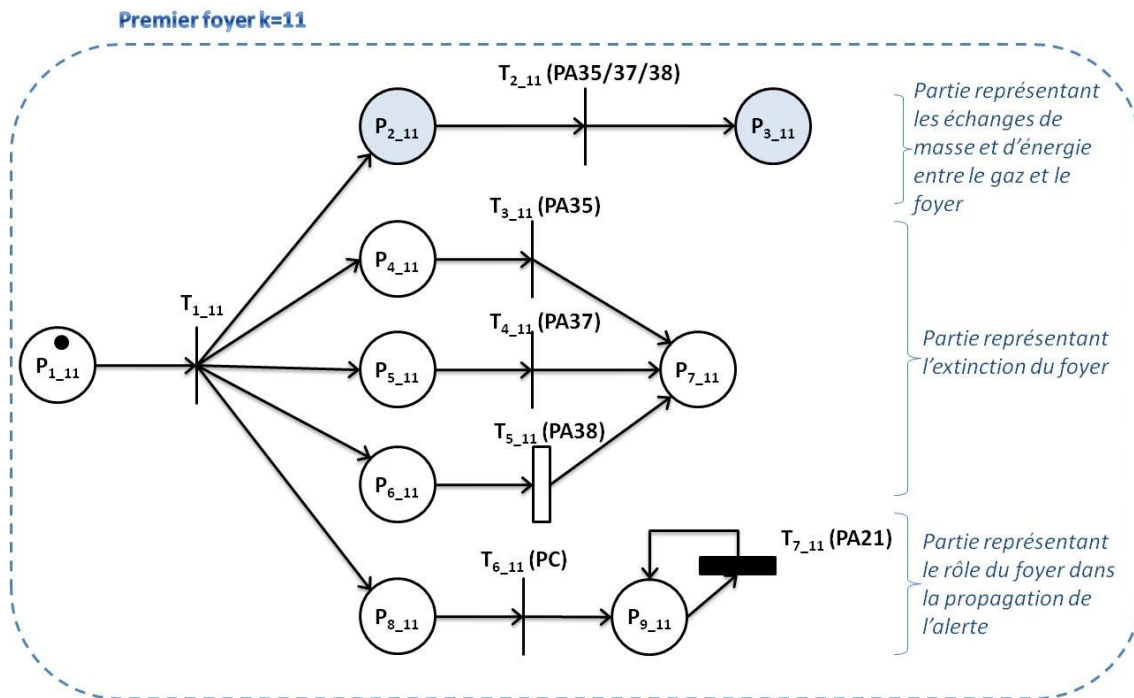
TABLEAU 25 : RDPE CONSTRUITS POUR LA TRAME ET INDICES DES OBJETS REPRÉSENTÉS

Afin de limiter le présent chapitre, un seul de ces RDPE est présenté ici. D'autres sont disponibles en annexes. Le choix s'est porté sur le premier foyer, parce qu'un réseau représentant un foyer n'a pas encore été commenté dans le corps de la thèse.

IV.B Exemple détaillé d'un réseau élémentaire : le premier foyer

La présente illustration concerne le premier foyer démarrant dans la chambre. Cet exemple a été retenu car la construction du réseau a nécessité des ajustements par rapport à la démarche de construction de réseau du troisième chapitre. Ces ajustements sont identifiés et discutés au paragraphe IV.C. De plus, le réseau finalement obtenu est détaillé aux paragraphes IV.B.a), IV.B.b) et IV.B.c). Ce réseau est ensuite commenté au paragraphe IV.B.d). Enfin, les processus d'action relatifs à ce réseau sont regroupés en partie III.D.e).

IV.B.a) Structure et marquage initial



Avec :

$P_{1,11}$: place d'initialisation

$P_{2,11}$: le premier foyer est actif – calcul des flux de masse et d'énergie échangés entre le foyer et le gaz

$P_{3,11}$: le premier foyer est éteint – calcul des flux masse et d'énergie échangés entre le foyer et le gaz durant la phase d'extinction

$P_{4,11}$: le premier foyer dispose des conditions nécessaires pour être actif – ici l'embrasement généralisé n'a pas encore eu lieu

$P_{5,11}$: le premier foyer dispose des conditions nécessaires pour être actif – ici le combustible est présent en quantité suffisante

$P_{6,11}$: le premier foyer dispose des conditions nécessaires pour être actif – ici il n'a pas encore été attaqué par les secours

$P_{7,11}$: le premier foyer ne dispose plus des conditions nécessaires pour être actif

$P_{8,11}$: le premier foyer n'a pas encore créé de signal de danger, il n'est pas détectable

$P_{9,11}$: le premier foyer a créé un signal de danger, il est détectable

$T_{1,11}$: transition d'initialisation servant au tir de variables aléatoires

$T_{2,11}$: extinction du premier foyer - cette transition sert à ramener le jeton en $P_{3,11}$ (cf. PA n°35, n°37 et n°38)

$T_{3,11}$: embrasement généralisé (cf. PA n°35)

T_{4.11} : épuisement du combustible (cf. PA n°37)

T_{5.11} : attaque des secours (Cf. PA n°38)

T_{6.11} : création d'un signal de danger (cf. processus de création dans la boîte Q)

T_{7.11} : transmission du signal de danger – ici alerte de l'occupant (cf. PA n°21)

IV.B.b) Annotations

Variables :

$X_{ci_11} : \{\Delta t_{a2}; c_2; \dot{Q}_{m1}; P_{21}; Z_0\}$

$X_{vi_11} : \{\Delta t_{a1}; \Delta t_d; t_d; d; c_1; \dot{Q}_{m2}; T_f; P_{o21}; blo_1\}$

$X_{cp_11} : \{ip\}$

$X_{vp_11} : \dot{Q}; m_p$

$X_{im_11} : \{t; T_{zh}; T_{zb}; Y_{o2,zb}; Y_{f,zb}; Z; m(X_{vp,6}); m(X_{vp,7})\}$

Conditions de sensibilisation :

$e_{1.11} : \dots$

$e_{2.11} : blo_1$

$e_{3.11} : T_{zh}^{ip} > T_f \wedge \overline{blo_1}$

$e_{4.11} : m_p > (500 + m(X_{vp,6}) + m(X_{vp,7})) \wedge \overline{blo_1}$

$e_{5.11} : \overline{blo_1}$

$e_{6.11} : \dots$

$e_{7.11} : P_{o21}$

Fonctions de jonction :

$$j_{1.11} : \left\{ \begin{array}{l} \Delta t_{a1} = U(180; 420); c_1 = \frac{\Delta t_{a1}}{2}; \dot{Q}_{m2} = U(1.10^6; 3.10^6); T_f = [273.15 + U(500; 600)] \\ P_{o21} = U(1; 100) \leq (P_{21} \times 100) \end{array} \right\}$$

$j_{2.11} : t_d = t$

$j_{3.11} : blo_1; \dot{Q} = Q(t; \Delta t_{a1}; \Delta t_{a2}; c_1; c_2; \dot{Q}_{m1}; \dot{Q}_{m2}; Z_0)$

$j_{4.11} : \Delta t_d = 60; d = 30; blo_1$

$j_{5.11} : blo_1$

$j_{6.11} : \dots$

$j_{7.11} : \dots$

Fonctions continues :

$F_{1.11} : m_p = F(t; T_{zb}^{ip}; Y_{o2,zb}^{ip}; Y_{f,zb}^{ip}; Z^{ip}; \Delta t_{a1}; \Delta t_{a2}; \Delta t_d; c_1; c_2; \dot{Q}_{m1}; \dot{Q}_{m2}; Z_0)$

$F_{2.11} : F(t; T_{zb}^{ip}; Y_{o2,zb}^{ip}; Y_{f,zb}^{ip}; Z^{ip}; \Delta t_d; t_d; d; Z_0)$

$F_{3.11} : \dots$

$F_{4.11} : \dots$

$F_{5.11} : \dots$

$F_{6.11} : \dots$

$F_{7.11} : \dots$

$F_{8.11} : \dots$

$F_{9.11} : \dots$

Informations pour fusions :

T_{7.11} fusionne avec T_{5.18}, avec k=18, l'indice de l'occupant du studio sinistré

IV.B.c) Nomenclature et valeurs initiales des variables

Variable	Description	Valeur initiale
$\Delta t_{a1}; \Delta t_{a2}; \Delta t_d$	les durées de croissance et de décroissance des différentes phases d'activité du foyer (phase de démarrage, phase de développement, phase d'extinction)	Respectivement : $\infty; 60$ et 0 sec (∞ signifie que la valeur de la variable est attribuée au cours du scénario)
$c_1; c_2; d$	des coefficients traduisant la cinétique de croissance et de décroissance des différentes phases d'activité du foyer	Respectivement : $\infty; 30$ et 0 sec

Variable	Description	Valeur initiale
t_d	l'instant du début de la phase de décroissance	∞
$\dot{Q}_{m1}; \dot{Q}_{m2}$	les débits calorifiques maximaux obtenus pendant les différentes phases d'activité du foyer	Respectivement : $0,3.10^6 \text{ W}$; ∞
$\dot{Q}$	le débit calorifique réellement obtenu à un instant t	∞
m_p	la masse totale de combustible brûlée depuis le début du scénario (en équivalent bois)	0
z_0	l'altitude de l'objet combustible par rapport au niveau du plancher	0 m
T_f	Température à laquelle l'embrasement généralisé (feu très sévère) survient	∞
blo_1	une variable booléenne indiquant si le foyer a déjà subi une extinction	$\overline{blo_1}$
ip	local dans lequel le foyer se trouve	1 (studio sinistré)
P_{21}	la fréquence d'occurrence du processus d'action n°21	0,7
Po_{21}	une variable booléenne traduisant, pour le scénario courant, la possibilité d'occurrence du processus d'action n°21	$\overline{Po_{21}}$
t	l'instant courant	0
$m(X_{vp,6}); m(X_{vp,7})$	la quantité de combustible que les autres studios des ailes apportent au foyer (en équivalent bois), variables images lues chez les objets les variables $k=6$ et $k=7$	fixées dans les objets $k=6$ et $k=7$, c.à.d. les portes des autres studios des ailes n°1 et n°2
$T_{zh}; T_{zb}$	les températures des zones hautes et basses dans tous les locaux du bâtiment	fixées par CIFI 2009
$Y_{O_{2,zb}}; Y_{f,zb}$	les fractions massiques de dioxygène et de fuel des zones basses dans tous les locaux du bâtiment	fixées par CIFI 2009
Z	les hauteurs d'interface thermique dans tous les locaux du bâtiment	fixées par CIFI 2009

Routine ou fonction	Descriptif
$T(\dots)$	une routine CIFI 2009 calculant la valeur du débit calorifique à un instant t
$F(\dots)$	une routine CIFI 2009 calculant les échange de masse et d'énergie entre le premier foyer et le gaz ET la masse totale de combustible brûlée depuis le début du scénario (en équivalent bois)
$Q(\dots)$	une routine CIFI 2009 calculant le débit calorifique obtenu à un instant t , en prenant en compte un éventuel défaut de comburant
$U(x_1; x_2)$	une fonction de Scilab qui renvoie un nombre entier dans l'intervalle $[x_1; x_2]$, avec une loi de distribution uniforme

IV.B.d) Commentaires

Au début d'un scénario, la place $P_{1,1}$ est marquée, et le réseau n'est pas encore initialisé. Le tir de $T_{1,1}$ fixe la valeur des variables aléatoires suivantes, pour le scénario courant :

- Δt_{a1} : la durée de la phase de démarrage, tirée entre 3 et 7 minutes (soit entre 180 et 420 secondes) ;
- c_1 : un coefficient traduisant la cinétique de croissance du foyer durant la phase de démarrage. Ce coefficient vaut toujours la moitié de la durée de la phase de démarrage ;
- T_f : la température à laquelle l'embrasement généralisé survient. Conformément à ce qui est défini dans la trame (cf. III.D.e), cette température est fixée entre 500 et 600°C ;
- Po_{21} : une variable booléenne traduisant, pour le scénario courant, la possibilité d'occurrence du processus d'action n°21. Cette variable est prise la valeur booléenne vraie dans 70% des scénarios et la valeur booléenne fausse dans les 30% restants.

À partir de cet instant, le réseau est initialisé. Le marquage indique alors :

- que le foyer est actif ($P_{2,11}$ est marquée) ;

- que le foyer dispose des conditions nécessaires pour être actif ($P_{4,11}$, $P_{5,11}$ et $P_{6,11}$ sont marquées) ;
- que le foyer n'est pas encore détectable ($P_{9,11}$ est marquée).

Si, pour le scénario courant, le foyer est détectable par l'occupant (c'est-à-dire que $P_{0,21}$ est vraie, ce qui signifie ici que l'occupant est éveillé), la transition $T_{6,11}$ est tirée. Ce tir est suivi immédiatement du tir de la transition $T_{7,11}$, qui correspond à l'alerte de l'occupant (détection effective).

Pendant ce temps, la place $P_{2,11}$ reste marquée et les flux de gaz et d'énergie entre ce premier foyer et le gaz environnant sont calculés (cf. la fonction continue $F_{2,11}$ qui appelle la routine F de CIFI 2009). En outre, cette routine calcule les débits calorifiques et de création de masse gazeuse survenant au niveau du foyer (cf. processus de création dans la boîte A de la Figure 72). Enfin, elle permet de calculer la masse totale de combustible brûlée depuis le début du scénario (en équivalent bois). Connaître cette masse à chaque instant sert à prédire l'extinction du foyer par épuisement de combustible.

Durant le scénario, il est possible que les conditions d'un foyer actif ne soient plus réunies, et ce pour l'une des trois raisons énoncées ci-dessous :

- parce que tout le combustible disponible a été brûlé (tir de la transition $T_{4,11}$, correspondant au PA n°37) ;
- parce que les secours attaquent le foyer (tir de la transition $T_{5,11}$, correspondant au PA n°38) ;
- parce que les conditions thermiques d'embrasement généralisé sont atteintes (tir de la transition $T_{3,11}$, correspondant au PA n°35).

Dans les trois cas, la transition $T_{2,11}$ est tirée et le premier foyer s'éteint (cf. la fonction de jonction $j_{2,1}$ fixant la variable t_d à l'instant courant). La place $P_{2,1}$ est alors marquée et la fonction continue $F_{2,1}$ calcule les flux de gaz et d'énergie entre ce premier foyer et le gaz environnant durant la phase d'extinction. Cependant, les caractéristiques de la phase d'extinction diffèrent selon les raisons de son occurrence. En effet, l'extinction est brutale lorsqu'elle est causée par l'embrasement généralisé et par la lutte des secours, alors qu'elle est progressive lorsqu'elle découle de l'épuisement du combustible (cf. la fonction de jonction $j_{4,1}$ qui modifie les variables de durée et de cinétique de la phase d'extinction Δt_d et d). Le choix d'une extinction brutale s'explique par le fait que l'action de la lutte sur le foyer est difficile à modéliser⁶⁰ ; et qu'en cas d'embrasement généralisé, le second foyer prend le relais. À ce propos justement, la routine Q de CIFI 2009, appelée dans la fonction de jonction $j_{3,1}$, sert à mémoriser la valeur du débit calorifique (noté $\dot{Q}$) obtenu à l'instant d'embrasement généralisé. Ce débit est alors utilisé par le RDPE représentant le second foyer (cf. le partage de variable puisque la variable $\dot{Q}$ est publique) pour ajuster correctement l'évolution du débit calorifique après embrasement généralisé.

Le dernier point à noter concerne le calcul du combustible disponible. Hypothèse a été prise dans la définition de la trame qu'à chaque ruine de porte des autres studios (quelle que soit l'aile), de la masse combustible étaient ajoutée aux foyers (cf. les PA n° 46 et n°47 du Tableau 23). Cette hypothèse a engendré un partage de variable entre ces portes et les (premier et second) foyers (cf. les variables images $m(X_{vp,6})$ et $m(X_{vp,7})$, représentant les quantités de combustible que les autres studios des ailes apportent au foyer).

⁶⁰ Le principe de parcimonie a été retenu ici.

IV.C Retour d'expérience sur la démarche de traduction

Durant cette application, la démarche a bien fonctionné pour la construction de la structure et pour la grande majorité des annotations des RDPE. Toutefois, quelques ajouts ont été nécessaires dans les annotations afin de représenter certaines hypothèses physiques.

Les hypothèses concernées sont les suivantes :

- lorsque la porte de l'un des autres studios se ruine, de la masse combustible est ajoutée au foyer pour allonger son autonomie ;
- lorsque le flashover survient, le premier foyer s'éteint et le second foyer s'allume ;
- les cinétiques de la phase d'extinction sont différentes selon l'origine de l'extinction.

La modélisation des deux premières hypothèses a requis, en plus des annotations issues de la démarche de traduction :

- des variables partagées supplémentaires (cf. les variables images $m(X_{vp,6})$ et $m(X_{vp,7})$; et la variable publique $\dot{Q}$ du réseau représentant le premier foyer) ;
- des ajouts dans certaines fonctions de jonction, nécessaires pour faire évoluer la valeur de ces variables (cf. la fonction de jonction $j_{3,1}$ qui fait évoluer la valeur de $\dot{Q}$).

La modélisation de la dernière hypothèse a engendré des ajouts dans une fonction de jonction (cf. la fonction de jonction $j_{4,1}$ qui modifie les variables de durée et de cinétique de la phase d'extinction Δt_d et d).

En conclusion, certaines hypothèses de simplification des phénomènes physiques nécessitent des ajouts de variables ou de fonctions de jonction, en plus des annotations issues de la démarche de traduction. Sachant que ces hypothèses sont très spécifiques au cas traité, leur intégration dans une démarche de construction de réseaux de Petri qui se veut générale n'a pas été envisagée dans ce travail.

IV.D Simulation des scénarios et recherche de situations de danger dans les scénarios

Après l'implémentation des réseaux dans SCHEMA-SI, les simulations peuvent débuter. Pour cette application, 6 900 scénarios par stratégies ont été simulés. Les résultats fournis par SCHEMA-SI ont été de deux types :

- l'évolution des grandeurs physiques au cours du temps pour chaque scénario ;
- les tirs datés de toutes les transitions des réseaux, pour chaque scénario.

Certains tirs de transitions correspondent à l'occurrence des E.N.S., la recherche de situations de danger dans les scénarios revenait à rechercher ces tirs.

Le paragraphe suivant propose quelques traitements de ces résultats.

V. EXEMPLES DE RÉSULTATS

L'objectif de ce paragraphe est de mettre en avant les apports de la méthode pour décider des mesures à retenir. Pour y parvenir, plusieurs traitements de résultats ont été réalisés et quelques extraits sont présentés ci-après.

V.A Utilisation de la fréquence d'occurrence des E.N.S. par stratégie

Le Tableau 26 fournit la fréquence d'occurrence des E.N.S. exprimée en %. Dans ce tableau, les cases vertes indiquent que la fréquence d'occurrence est inférieure de 5% à celle de la configuration actuelle de l'établissement qui fait office de base d'acceptabilité (stratégie A). Si elle est orange, c'est que la fréquence est de 5% plus élevée que celle de la stratégie A. Entre ces deux valeurs la case est coloriée en jaune. Une case verte indique une stratégie qui est plus sécuritaire vis-à-vis d'un E.N.S. et une case orange une stratégie qui l'est moins. Une case jaune indique que la stratégie n'a pas d'effet significatif. Enfin « <0,01 » indique qu'aucun scénario n'a conduit à l'E.N.S. dans cette stratégie et que par conséquent la fréquence d'occurrence est inférieure à l'inverse du nombre de scénarios simulés fois cent.

	Stratégie A : état actuel	Stratégie B : recoupement	Stratégie C : ventilation	Stratégie D : recoupement et ventilation
E.N.S. 1 : Décès du résident du studio sinistré	39,56	38,60	38,15	39,21
E.N.S. 2 : Décès des résidents des studios de l'aile 1	17,56	18,19	17,80	19,04
E.N.S. 3 : Décès des résidents des studios de l'aile 2	10,61	4,47	10,91	4,69
E.N.S. 4 : Feu généralisé aux studios de l'aile 1	8,41	14,44	9,87	14,54
E.N.S. 5 : Feu généralisé aux studios de l'aile 2	0,04	<0,01	0,12	<0,01
E.N.S. 6 : Feu généralisé à la cage d'escalier	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01

TABLEAU 26 : COMPARAISON DES FRÉQUENCES D'OCCURRENCE D'E.N.S. PAR STRATÉGIE

En comparant les stratégies à la stratégie A, il apparaît trois résultats principaux.

Tout d'abord, la mesure de recoupement (stratégie B) a tendance à mieux protéger l'autre aile (c.-à-d. l'aile n°2), tant ses occupants (cf. E.N.S. n°3 - case verte) que son contenu (cf. E.N.S. n°5 - case verte). Cependant cette mesure de recoupement aggrave le risque d'extension de l'incendie dans l'aile où le feu démarre, c'est-à-dire l'aile n°1 (cf. E.N.S. 4 - case orange). Quant à la vie des personnes dans cette l'aile n°1, elle n'est pas plus exposée (cf. E.N.S. n°1 et n°2 – cases jaunes).

Ensuite, la mesure de ventilation (stratégie C) a tendance à augmenter le risque de propagation de l'incendie aux autres studios (E.N.S. n°4 et n°5 – cases oranges). La vie des personnes, quelle que soit leur aile, n'est pas plus exposée (cf. E.N.S. n°1, n°2 et n°3 – cases jaunes).

Enfin, la mise en œuvre simultanée des deux mesures de ventilation et de recoupement (stratégie D) améliore la sécurité dans l'aile n°2 (E.N.S. n°3 et n°5 – case verte) mais la dégrade dans l'aile n°1 (E.N.S. n° 2 et n°4 – case orange). Par ailleurs, la vie de l'occupant du studio sinistré n'est pas plus exposée (E.N.S. n°1 – case jaune).

Dans tous les cas, l'extension de l'incendie à la cage d'escalier est trop peu fréquente pour pouvoir conclure sur ce point (E.N.S. n°6 – fréquences <0,01% quelle que soit la stratégie).

En conclusion, avec ce type de résultats, le groupe de travail peut avoir une vision très macroscopique de la performance des stratégies. Selon les couleurs de cases apparaissant (et aussi l'écart entre les fréquences), une première comparaison des stratégies peut être effectuée.

Par exemple, les résultats du Tableau 26 semblent indiquer que la mesure de recoupement est la mieux adaptée, que celle de désenfumage est la moins adaptée et que le couplage de la mesure de ventilation avec la mesure de compartimentage ne semble pas apporter un gain supérieur à celui obtenu par la mesure de compartimentage seule. Toutefois, avec ces résultats, il n'est pas possible de spatialiser les E.N.S., c'est-à-dire de connaître le lieu où ils se sont produits. Pour cette raison, le Tableau 27 a été construit. Il fournit la fréquence d'occurrence du décès des trois catégories de résidents en fonction du lieu (studio ou CHC). Là encore, le code couleur est utilisé pour différencier la performance des stratégies.

	Stratégie A : état actuel	Stratégie B : recoupement	Stratégie C : ventilation	Stratégie D : recoupement et ventilation
E.N.S. 1 : Décès du résident du studio sinistré	39,56	38,60	38,15	39,21
...dans leur studio	36,22	35,44	36,91	36,09
...dans le couloir	3,34	3,16	1,24	3,12
E.N.S. 2 : Décès des résidents des studios de l'aile 1	17,56	18,19	17,80	19,04
...dans leur studio	3,75	6,13	4,27	6,09
...dans le couloir	13,81	12,06	13,54	12,95
E.N.S. 3 : Décès des résidents des studios de l'aile 2	10,61	4,47	10,91	4,69
...dans leur studio	<0,01	<0,01	0,05	<0,01
...dans le couloir	10,61	4,47	10,85	4,69

TABLEAU 27 : COMPARAISON DES FRÉQUENCES D'OCCURRENCE D'E.N.S. PAR LIEU ET PAR STRATÉGIE

La lecture du Tableau 27, permet effectivement d'affiner les résultats précédents. La comparaison se fait toujours par rapport à la stratégie A.

Tout d'abord, il apparaît que la mesure de recoupement (stratégie B) a tendance à améliorer les conditions dans les circulations (E.N.S. n°1, E.N.S. n°2 et E.N.S. n°3 – cases vertes dans le couloir) mais à les aggraver dans les studios de l'aile n°1 (E.N.S. n°2 – cases oranges dans les studios).

Ensuite, il apparaît que la mesure de ventilation (stratégie C) améliore la sécurité de l'occupant du studio sinistré dans le couloir (E.N.S. n°1 – case vert dans le couloir) mais pas celle des autres occupants, utilisant pourtant le même couloir (E.N.S. n°2 – case orange dans le couloir). En outre, cette mesure tend à aggraver la fréquence de l'extension du feu aux autres studios, quelle que soit leur aile.

Enfin, la mise en œuvre simultanée d'une mesure de recoupement et de ventilation (stratégie D) semble améliorer les conditions dans les circulations (E.N.S. n°1, n°2 et n°3 – cases vertes dans le couloir) mais à les aggraver dans les studios de l'aile n°1 (E.N.S. n°2 – cases oranges dans les studios).

En conclusion, ce type de résultats permet par exemple de poser la question de la pertinence d'une consigne d'évacuation (sortir dans le couloir) ou de confinement (rester chez soi). Afin de d'affiner les possibilités d'analyse, l'ajout de la dimension temporelle est souhaitable. Pour cette raison, les histogrammes temporels d'occurrence des E.N.S. du paragraphe V.B ont été construits.

Récapitulatif des seuils de significativités utilisés

Par ailleurs, le Tableau 28 récapitule les seuils de significativité utilisés pour colorier les cases en orange, jaune et vert. La limite inférieure correspond à la valeur de référence moins 5% et la limite supérieure à la même valeur plus 5%. Le choix de cette valeur de 5 % pose la question de la fiabilité des résultats. En effet, plus la confiance dans les résultats est grande, plus cette valeur peut être petite. Cependant, une valeur trop petite peut avoir pour effet de faire apparaître des tendances qui ne sont pas significatives. Dans le cas de cette application et au vue des résultats mitigés, l'utilisation d'une valeur plus haute (comme 15% par exemple) mène à des codes couleurs quelque peu différents. Une réflexion sur le seuil de significativité le plus approprié devrait idéalement être entreprise.

Seuils de significativité		
<i>Valeur de référence</i>	<i>Limite de significativité inférieure</i>	<i>Limite de significativité supérieure</i>
39,56	37,59	41,54
36,22	34,41	38,03
17,56	16,68	18,44
13,81	13,12	14,50
10,61	10,08	11,14
8,41	7,99	8,83
3,75	3,56	3,94
3,34	3,18	3,51
0,04	0,04	0,05
0,01	0,01	0,01

TABLEAU 28 : SEUILS DE SIGNIFICATIVITÉ UTILISÉS POUR COMPARER LES FRÉQUENCES D'OCCURRENCE D'E.N.S. PAR STRATÉGIE

V.B Utilisation des histogrammes temporels d'occurrence des E.N.S.

L'analyse approfondie des instants d'occurrence des E.N.S. permet de tirer de plus amples d'informations sur les scénarios. Dans le présent paragraphe, seuls quelques E.N.S de la stratégie D sont analysés à titre illustratif.

Analyse du décès de l'occupant du studio sinistré – E.N.S. n°1

Au total, l'occupant du studio sinistré a perdu la vie dans 2 706 scénarios sur 6 900, soit une fréquence d'occurrence de 39,21%.

En s'intéressant aux instants auxquels cet événement est survenu dans les différents scénarios, il est possible de tracer l'histogramme de répartition de décès suivant.

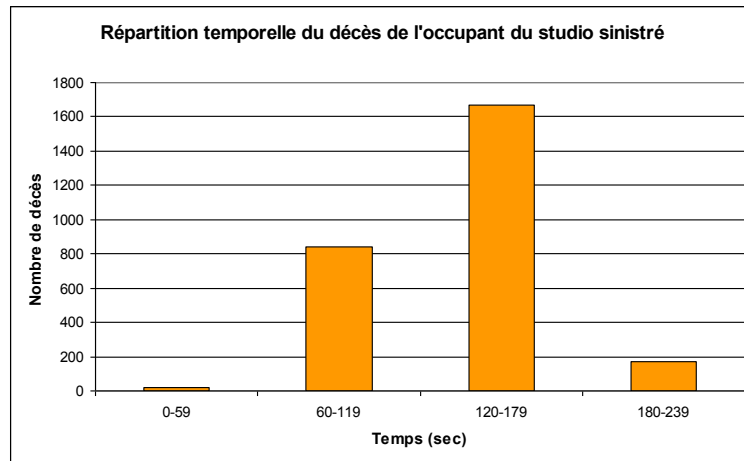


FIGURE 82 : HISTOGRAMME DE RÉPARTITION TEMPORELLE DE L'E.N.S. N°1 POUR LA STRATÉGIE D

La lecture de cet histogramme permet d'affirmer que le décès, s'il survient, se situe toujours **avant 4 minutes** (soit 240 secondes), avec des pics à la deuxième et à la troisième minute.

De même, en cherchant dans quel local ce décès a eu lieu, il est possible d'affirmer que, dans 92% des scénarios menant au décès (soit dans 36% des scénarios simulés), l'occupant décède dans son studio. S'il décède dans le couloir (8% des scénarios menant au décès, soit 3% des scénarios simulés), **c'est toujours parce qu'il n'a pas refermé la porte derrière lui** (cf. Tableau 29).

Est-il sorti de son studio ? A-t-il refermé la porte? (s'il est sorti)		Nombre de décès	Proportion
Oui		213	8%
	Non	213	8%
	Oui	0	0%
Non		2 493	92%
Total		2 706	100%

TABLEAU 29 : RÉPARTITION SPATIALE DE L'E.N.S N°1 SELON L'ÉTAT DE LA PORTE DU STUDIO SINISTRÉ POUR LA STRATÉGIE D

Analyse du décès des autres occupants de l'aile n°1 – E.N.S. n°2

Au total, les occupants de l'aile n°1 ont perdu la vie dans 1 314 scénarios sur 6900, soit une fréquence d'occurrence de 19,04 %. Parmi ces décès, 420 (soit environ 6 %) ont lieu pendant que les occupants sont dans leur studio (ignorant la présence du feu ou confinés) et 894 (soit environ 13 %) pendant qu'ils évacuent.

L'analyse de la répartition temporelle des décès (cf. Figure 83) apportent quelques informations additionnelles. En effet, les décès, s'ils surviennent, se situent principalement **avant 5 minutes** (soit 300 secondes), avec des pics à la troisième et à la quatrième minute. La très grande majorité des décès survenus avant 5 minutes ont eu lieu dans la circulation, ce qui signifie que les pics observés en début d'historgramme correspondent aux instants auxquels les occupants sortent de leur studio après avoir été alertés (soit par l'occupant, soit par l'alarme). Une seconde vague de décès est observée aux alentours de **20 minutes**, et cette vague correspond au cas où les occupants confinés, ou ignorant le danger, décèdent dans leur studio. Les 20 minutes correspondent donc au temps moyen nécessaire pour que la porte se ruine du fait de la chaleur

régnant dans la circulation. Les décès survenant à d'autres instants correspondent à la fois au cas où les occupants sortent dans la circulation sans avoir été préalablement alertés, et au cas où les occupants décèdent dans leur studio du fait de la ruine de la porte.

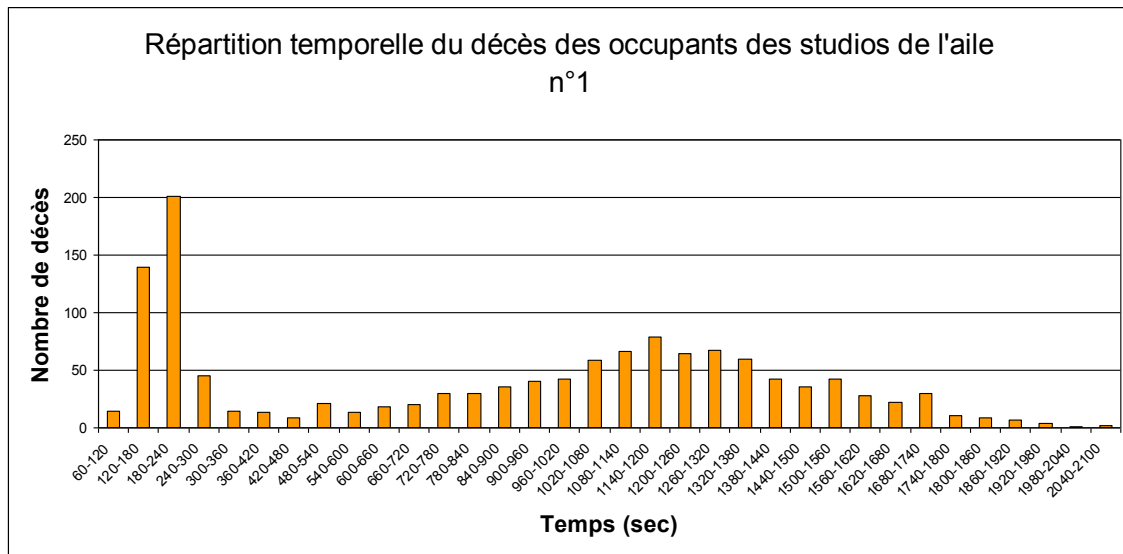


FIGURE 83 : HISTOGRAMME DE RÉPARTITION TEMPORELLE DE L'E.N.S. N°2 POUR LA STRATÉGIE D

Extension de l'incendie – E.N.S. n°4, n°5 et n°6

L'incendie ne s'étend jamais ni à la cage d'escalier, ni aux studios de l'ailé n°2. Autrement dit, les conditions régnant dans le hall et dans le couloir de l'ailé n°2 ne sont pas assez agressives pour ruiner les portes. Cependant, l'incendie s'étend aux autres studios de l'ailé n°1, et ce dans 1 003 scénarios sur 6 900 scénarios simulés, soit une fréquence d'occurrence de l'E.N.S. de 14,54 %. La répartition temporelle de cet E.N.S. confirme la constatation faite au paragraphe traitant de l'E.N.S. n°2, à savoir que le temps moyen nécessaire pour que la porte se ruine du fait de la chaleur régnant dans la circulation se situe autour de 20 minutes. De plus, les premières ruines se situent aux alentours de 11 ou 12 minutes et les dernières autour de 35 minutes. Par ailleurs, la répartition autour de la moyenne a plus ou moins l'allure d'une courbe de Gauss⁶¹, ce qui est intéressant à noter puisque les temps de résistance donnés en entrée étaient équiprobables entre 5 et 25 minutes. Les différences sont liées à l'activité du foyer, aux mouvements des vantaux, aux systèmes de compartimentage et de ventilation et bien sûr au modèle de ruine de porte retenu. Par ailleurs, la baisse du nombre de ruine, observée après 25 minutes (soit 1 500 secondes) correspond sûrement au déclin du foyer par épuisement (de combustible ou de comburant) et donc à des conditions plus supportables dans la circulation.

⁶¹ L'explication de cette répartition requerrait une analyse plus minutieuse qui n'a pas été menée dans le cadre de cette recherche doctorale puisqu'elle ne correspondait pas directement avec le sujet de recherche.

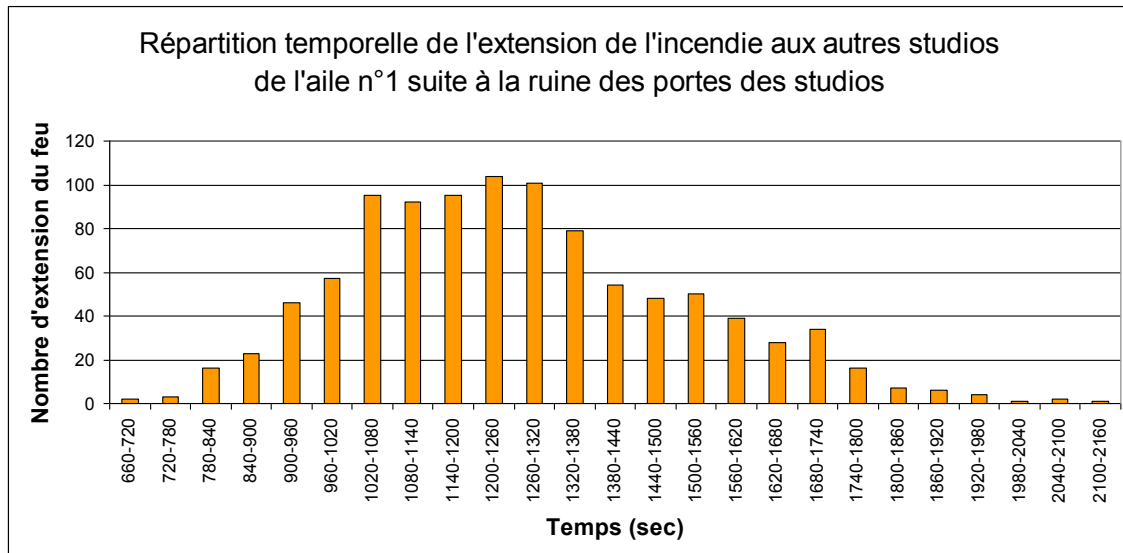


FIGURE 84 : HISTOGRAMME DE RÉPARTITION TEMPORELLE DE L'E.N.S. N°4 POUR LA STRATÉGIE D

V.C Synthèse

Plusieurs conclusions peuvent être tirées des types de résultats présentés.

Tout d'abord, ces résultats permettent **trois niveaux d'analyse complémentaires**. Le premier correspond à un **niveau macroscopique**. Ce niveau est particulièrement utile pour dégrossir la comparaison puisqu'il est adapté pour tirer les premières tendances et pour proposer de premières hypothèses d'explications. Le second correspond à un **niveau spatialisé**, particulièrement judicieux pour identifier les locaux à risque. Enfin, le dernier correspond au **niveau temporalisé** et permet de repérer les instants critiques. Par ailleurs, les deux derniers niveaux sont utiles pour confirmer ou infirmer les hypothèses posées au premier niveau de l'analyse. Toutefois, d'autres niveaux d'analyse pourraient être ajoutées, notamment avec la possibilité d'isoler les scénarios ayant menés aux E.N.S. et de les analyser plus en détail (p. ex. : avec d'autres outils de simulations plus fins).

Ensuite, les résultats présentés posent un questionnement quant à :

- la pertinence du modèle physique ;
Par exemple, dans le cadre de cette application, le sous-modèle de ruine de vantaux.
- la manière dont les mesures ont été représentées ;
Par exemple, la pertinence d'avoir considéré une mesure de ventilation et non une mesure de désenfumage.
- l'intuition que l'on avait de l'efficacité présumée d'une mesure ;
Par exemple, la mesure de ventilation qui, contre toutes attentes, ne semble pas efficace.
- d'autres mesures à évaluer.
Par exemple, l'ajout de ferme-portes puisqu'à chaque fois que l'occupant du studio sinistré perdait la vie dans le couloir, il n'avait pas refermé la porte derrière lui.

Remarque :

Au vu de l'éventuelle faiblesse du public accueilli, l'installation de ferme-portes peut poser des difficultés d'utilisation des portes au quotidien.

Enfin, d'une manière générale, les **résultats** doivent sans cesse être **mis en parallèle** avec les **comportements définis dans la trame**. Pour y parvenir, deux perspectives semblent

prometteuses. D'une part, l'utilisation **d'arbres d'événements** pour dessiner les séquences qui se sont réalisées dans les scénarios. L'ajout de la temporalité et de la fréquence d'occurrence des séquences à ces arbres les rendrait idéaux pour une **comparaison avec les arbres d'interaction** fournis en entrée (ceux du paragraphe III.E.a). D'autre part, faciliter **l'édition des résultats du modèle physique** (p. ex. : l'évolution des températures de zone au cours du temps) permettrait de **visualiser l'impact des comportements de foyer** (apport de combustible) **et d'ouvrants** (apport de comburant) considérés en entrée. En outre, ces résultats du modèle physique seraient d'une aide précieuse pour confirmer et infirmer les hypothèses d'explication imaginées.

**SYNTHÈSE DU
CHAPITRE :**

Tout d'abord, ce chapitre a montré, sur ce cas pratique tout du moins :

- que le langage ISI-Systema détaillé au troisième chapitre est adapté pour construire, pour représenter graphiquement et pour valider la trame ;
- que ce langage est par ailleurs d'une aide précieuse dans la définition rigoureuse des événements et de leurs potentielles interactions (enchaînements ou empêchements) ;
- que la démarche de construction de réseaux de Petri détaillée au quatrième chapitre est valide, à l'exception de quelques ajouts imposés par des hypothèses physiques spécifiques au cas traité.

Ensuite, ce chapitre a présenté le type de résultats obtenus avec SCHEMA-SI et a permis de tirer des perspectives dans le traitement et l'analyse de ces résultats.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Conclusion

Ce travail a montré que **l'une des difficultés** à surmonter pour construire la méthode d'analyse de risque était celle de **la mise en données** du problème de sécurité incendie à résoudre. L'idée fondatrice imaginée pour répondre à cette difficulté est celle :

- d'utiliser un **langage simple** pour **poser les hypothèses de modélisation** (appelées **trame** dans ce travail) sous la forme d'un **modèle graphique** ;
- puis de **traduire** ce modèle graphique en **réseaux de Petri** compatibles avec l'outil SCHEMA-SI.

Cette idée a donné naissance à ce qui a été appelé la **méthode ISI-Systema** ; méthode qui n'est autre qu'un sous-ensemble de la méthode d'analyse de risque.

L'élaboration de la méthode ISI-Systema a mis en évidence **trois** résultats principaux.

Tout d'abord, qu'il est possible de **représenter graphiquement** la trame autrement que sous la forme d'un réseau de Petri. En effet, les **concepts de la systémique** (notamment la notion de processus) sont particulièrement bien adaptés pour cette représentation. Le langage ISI-Systema, fondé sur ces concepts systémiques, offre en outre l'avantage d'une **définition claire et précise** :

- des **fonctions** remplies par les entités du bâtiment en feu (p. ex. : une porte, un détecteur, un individu...) ;
- des **événements** pouvant survenir et de leurs interactions dans le temps et dans l'espace.

Il en découle que la trame construite avec ce langage est suffisamment détaillée pour laisser clairement apparaître les hypothèses de modélisation posées. La **réfutabilité** de la trame en est augmentée, ce qui est essentiel dans le cadre d'une étude de sécurité. En outre, cette clarté permet un **gain de communication** important dans une démarche qui se veut multi-acteurs.

Ensuite, l'élaboration de cette méthode a montré que les **représentations matricielles et arborescentes** sont adaptées pour identifier les **contradictions** dans la définition des événements. La vérification de la **cohérence** de la trame à travers l'identification et l'éventuelle **correction** des séquences d'événements possibles dans les scénarios est également facilitée par ces représentations.

Enfin, ce travail a montré qu'il est possible de construire des réseaux de Petri compatibles avec SCHEMA-SI de manière systématisable, à condition de suivre les règles établies dans cette thèse. De plus, en raison de la portée très générale de ces règles, la construction de ces réseaux pourra un jour être automatisée.

Perspectives d'amélioration

Les perspectives de ce travail peuvent être résumées en trois verbes : informatiser, consolider et intégrer. Chacun de ces verbes fait l'objet de l'un des paragraphes suivants.

Tout d'abord, la construction d'une trame et sa traduction en réseaux de Petri reste chronophage. Pour rendre ce travail pleinement opérationnel en ingénierie de la sécurité incendie, **la démarche et les outils** proposés tout au long de la thèse devraient être **informatisés**. Cette informatisation permettra notamment de faciliter :

- les représentations graphiques avec le langage ISI-Systema ;
- la construction de la matrice et des arbres d'interaction ;

- la génération des réseaux de Petri.

Ensuite, les travaux de thèse font référence à un vocabulaire spécifique : celui de la systémique et des réseaux de Petri. Il faudra veiller à ce que ce vocabulaire soit bien compris par les utilisateurs qui ne sont pas experts de tous les domaines englobés par la sécurité incendie et ceci pour éviter d'engendrer des problèmes d'incompréhension. De plus, la méthode pourrait offrir un nombre trop important de degrés de liberté de modélisation (en particulier pour la description des processus d'action). Il faudra donc proposer des modèles génériques et des listes de processus d'action pré-remplis pour guider le groupe de travail. D'une manière générale, l'utilisation de la méthode par plusieurs groupes de travail différents permettrait de constater si elle est ou non opérationnelle en l'état.

Enfin, l'élaboration de la méthode ISI-Systema n'est qu'une pierre posée à l'édifice de la construction de la méthode d'analyse de risque. De nombreuses questions subsistent encore, et le premier chapitre met d'ores et déjà en avant des pistes de recherche, comme, par exemple, le traitement des résultats ou l'ouverture aux outils d'aide à la décision. En parallèle, des travaux restent à mener sur l'outil SCHEMA-SI lui-même. D'une part, l'amélioration de CIFI 2009 demeure un objectif majeur. La confrontation à des expériences ainsi que l'ajout d'un modèle d'allumage et d'extinction sont des exemples de pistes. D'autre part, le codage de l'assembleur et du joueur de réseau de Petri dans un langage de programmation plus adapté que l'interprété est souhaitable.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Bénichou N. [et al.] FIERAsystem: a fire risk assessment tool to evaluate fire safety in industrial buildings and large spaces [Article] // Journal of Fire Protection Engineering, p. 145-172. - 2005. - n°3 : Vol. 15.

Bodart Xavier Voyage au centre de CIFI [Rapport]. - Champs-sur-Marne : CSTB, 1990.

Bouyssou Denis Concepts et méthodes pour l'aide à la décision [Livre]. - Paris : Hermes Science Publications, 2006. - Vol. 2, risque et incertain.

Brillard Alain Réseaux de Petri [Conférence] // Cours Universitaire de Master recherche "Risques Technologiques et Naturels". - Mulhouse : Université de Haute Alsace, 2007.

Chabot Jean-Louis Approche probabiliste relative à l'étude des scénarios d'incendie // Thèse de doctorat. - Poitiers : Université de Poitiers, 1998.

Chorier Julien Diagnostic et évaluation des risques incendie d'une construction et de sa mise en sécurité // Thèse de doctorat. - Grenoble : Université de Savoie, 2007.

Cocco Claude et Hognon Bernard Sécurité Incendie - Mise en Sécurité des Bâtiments existants : habitation, ERP, bureaux, industrie, IGH... [Livre]. - Champs-sur-Marne : CSTB, 2004.

Curtat Michel Traité de Physique du Bâtiment - Physique du Feu pour l'Ingénieur [Livre]. - Cahors : CSTB, 2002. - Vol. III.

Dassens Audrey Méthode pour une Approche Globale d'Analyse des Risques en Entreprise // Thèse de Doctorat. - Mulhouse : Université de Haute Alsace, 2007.

De Rosnay Joel Le Macroscopie [Livre]. - Paris : Ed. du Seuil, 1975.

De Saussure Ferdinand Cours de linguistique générale [Livre]. - Paris : Payot, 1995.

Demouge François [et al.] Evaluation quantitative du schéma de sécurité incendie d'un hôtel, premiers résultats obtenus par des approches événementielles probabilistes [Rapport]. - Paris : PN-ISI, 2007.

Demouge François [et al.] Sécurité Incendie - Développement d'une Approche de Modélisation Stochastique Hybride [Conférence]. - Avignon : Institut de Maîtrise de Risques et de Sureté de Fonctionnement, 2008.

Demouge François et Fromy Philippe CIFI 2009 : Application d'un modèle à deux zones gazeuses à l'étude de l'influence des caractéristiques d'un local sur l'activité d'un feu s'y développant [Rapport]. - Champs-sur-Marne : CSTB, 2010.

DFHCM Fire Risk Evaluation To European Cultural Heritage (FIRE-TECH) user guide [Rapport]. - Bruxelles : UGent, 2005.

Donnadieu Gérard et Karsky Michel La Systémique, Penser et Agir dans la Complexité [Livre]. - Paris : Liaisons, 2002.

DSC Direction de la Sécurité Civile Les statistiques des services d'incendie et de secours [En ligne] // Ministère de l'Intérieur. - 2009. - 25 06 2020. - http://www.interieur.gouv.fr/sections/a_votre_service/statistiques.

Durand Daniel La Systémique [Livre]. - Paris : Que sais-je ?, 2010.

Evans D.D. et Stroup D.W. Methods to Calculate the Response Time of Heat and Smoke Detector Installed Below Large Unobstructed Ceilings [Rapport]. - Gaithersburg : NIST, 1985.

Fleury Gérard, Lacomme Philippe et Tanguy Alain Simulation à événement discrets [Livre]. - Paris : Eyrolles, 2006.

Franssen J.M., Kodur V.K.R. et J. Masson User's manual for SAFIR [Rapport]. - Liège, : Institut du Génie Civil, Université de Liège, 2004.

Frasel-Mitchell J.N. Risk Assessment of Factors Relating to Fire Protection in Dwellings [Conférence] // Fire Safety Science : Proceedings of the 5th International Symposium. - Melbourne : International Association for Fire Safety Science, 1997.

Friedenthal Sanford, Moore Alan et Steiner Rick A Practical Guide to SysML: The Systems Modeling Language [Livre]. - [s.l.] : Morgan Kaufmann; Revised edition, 2009.

Fromy Philippe, Muller Anne et Demouge François Application d'une approche stochastique hybride - Partie comparaison des modèles de zones CFAST et SCHEMA-SI sur un exemple [Rapport]. - Paris : PN-ISI, 2008.

Galea E.R. et Tavares M.R. Numerical Optimisation Techniques Applied to Evacuation Analysis [Conférence] // Pedestrian and Evacuation Dynamics. - Berlin : Springer, 2008.

Genrich H. J. et Lautenbach K. System Modelling with High-Level Petri Nets [Article] // Theoretical Computer Science. - 1981. - Vol. 13.

Godet Michel Manuel de prospective stratégique [Livre]. - Paris : Dunod, 2007. - Vol. 2 – L'art et la méthode.

Guyonnet Jean-François La maîtrise de l'incendie dans les bâtiments [Livre]. - Paris : Maloine, 1983.

Hognon Bernard Les victimes des feux en France dans les bâtiments d'habitation - examen de données quantitatives [Rapport]. - Champs-sur-Marne : CSTB pour le compte du Ministère de l'Emploi, de la Cohésion Sociale et du Logement, 2007.

Hognon Bernard MOCASSIN : une approche probabiliste de la sécurité incendie des ERP [Rapport]. - Champs-sur-Marne : Cahiers du CSTB n°2554, p. 28, 1992.

Hostikka S. and Keski-Rahkonen O. Probabilistic simulation of fire scenarios, p. 301-311 [Article] // Nuclear Engineering and Design. - 2003b. - Vol. 224.

Hostikka Simo and Keski-Rahkonen Olavi Probabilistic Fire Simulator - Theory and User's Manual for Version 1.2 [Report]. - Finland : VTT Publications, 2003a.

INERIS Sécurité Incendie dans les entrepôts [Revue]. - Paris : Technique de l'Ingénieur, 2005. - SE 2 055-1.

INVS Institut de Veille Sanitaire Bulletin épidémiologique hebdomadaire [En ligne] // Mortalité par accident de la vie courante en France métropolitaine. - 02 03 2010. - n°8. - 26 06 2010. - <http://www.invs.sante.fr/publications/default.htm>.

Jensen K. Coloured Petri Nets and the Invariant Method [Article] // Computer Science. - 1981. - Vol. 14.

Kaneka H. Etude par la méthode des éléments finis du comportement mécanique d'éléments plaque en acier soumis à l'incendie [Rapport]. - Saint-Rémi-les-Chevreaux : CTICM, 1990.

Kawagoe K. Fire Behaviour in Rooms [Rapport]. - Ibaraki-ken, Japan : Building Research Institute, 1958.

Kervern Georges-Yves et Boulenger Philippe Cindyniques, Concepts et mode d'emploi [Livre]. - Paris : Economica, 2007.

Kevern Goerges-Yves et Rubise Patrick L'archipel du danger [Livre]. - Paris : Economica, 1991.

Launay R., Donie Ph. et Kimmel D. Application de la Méthode MOSAR à l'Analyse de Sécurité d'Installation au CEA [Rapport]. - Saclay : Comité de l'Energie Atomique – Groupe d'Etude et de Prévention, 2002.

Launay Richard Méthode Organisée Systémique d'Analyse des Risques [Conférence] // Cours Universitaire de Master recherche "Risques Technologiques et Naturels". - Mulhouse : Université de Haute-Alsace, 2007.

Le Cardinal Gilles [et al.] Peurs, attraites et tentations (PAT) [Article] // Education et Management . - Créteil : CRDP Créteil, 1994. - 14.

Le Gallou François et Bouchon-Meunier Bernadette Systémique - Théorie et Applications [Livre]. - Paris : Technique et documentation - Lavoisier, 1992.

Le Moigne Jean-Louis La Théorie du Système Général - Théorie de la Modélisation [www.mcxapc.org]. - Version électronique : Réseau Intelligence de la Complexité, 2006.

Lesbats M., Dos Santos J. et Perillon P. Contribution à l'élaboration d'une Science du Danger [Conférence] // Actes des Assises Internationales des Sciences et Techniques du Danger. - Bordeaux : [s.n.], 1993.

Levin B.M. EXITT - a Simulation Model of Occupant Decisions and Actions in Residential Fires : User's Guide and Program Description [Rapport]. - Gaithersburgh : National Bureau of Standards, 1987.

Mac Grattan Kevin Fire Dynamics Simulator (version 4), Technical Reference Guide [Rapport]. - Gaithersburg : NIST, 2004.

Mangin Jean-Claude, Fromy Philippe et Demouge François Approche par simulation événementielle probabiliste - étude de la sensibilité des résultats en fonction de la variation des paramètres et des données sur une application à un hôtel [Rapport]. - Paris : PN-ISI, 2009.

McCaffrey B. J. Purely buoyant diffusion flames [Rapport]. - [s.l.] : NBS report - NBSIR n°79 - 1910, 1979.

Mizukami T. [et al.] A Compartment burning rate model for various scales [Conférence] // Proceedings of the Ninth International Symposium of Fire Safety Science. - 2008.

Morin Edgar Introduction à la pensée complexe [Rapport]. - Paris : Seuil, 2005.

Mortureux Yves Arbres de défaillance, des causes et des événements [Article] // Technique de l'Ingénieur. - 2002. - SE4050.

Muller Anne [et al.] Application d'une approche stochastique hybride - Partie évaluation de mesures de sécurité destinées à améliorer le niveau de sécurité d'un établissement [Rapport]. - Paris : PN-ISI, 2009b.

Muller Anne [et al.] Application d'une approche stochastique hybride à la sécurité incendie - Partie reconstitution d'un incendie récent [Rapport]. - Paris : PN-ISI, 2009a.

Muller Anne [et al.] Interflam [Conférence] // The use of a stochastic fire safety engineering tool for fire scene reconstruction. - Nottingham : Intersciences communications, 2010.

Muller Pierre-Alain et Gaertner Nathalie Modélisation Objet avec UML [Livre]. - Paris : Eyrolles, 2005.

Peacock R.D. [et al.] A User's Guide for FAST : Engineering Tools for Estimating Fire Growth and Smoke Transport [Rapport]. - Gaithersburg : NIST, 2000.

Peacock R.D. [et al.] An Update Guide for HAZARD I Version 1.2 [Report]. - Gaithersburg : NIST, 1994.

Peacock R.D. [et al.] CFAST – Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport [Rapport]. - Gaithersburg : NIST, 2005.

Perilhon Pierre Développement d'une Méthode Organisée Systémique d'Analyse des Risques [Rapport]. - 2003.

Perilhon Pierre MOSAR - Présentation de la Méthode [Article] // Technique de l'Ingénieur. - 2003. - SE4060.

Petri Carl Adam " Kommunikation mit Automaten " [Livre]. - Bonn : Institut für Instrumentelle Mathematik, 1962.

PN-ISI G1 Méthodologie générale pour la conception, la construction et l'exploitation d'ouvrages [Rapport]. - Paris : IREX, 2008.

Raclot Stéphane [et al.] Introduction à une méthode d'analyse et de couverture des risques (MACR) [Rapport]. - Paris : BSPP, 2010.

Ridoux Michel AMDEC - les moyens [Article] // Technique de l'Ingénieur. - 1999. - AG4220.

Robert Christian and Casella George Monte Carlo Statistical Methods [Book]. - London : Springer, 2004.

Royer Michel HAZOP : une méthode d'analyse des risques - Présentation et contexte [Article] // Technique de l'Ingénieur. - 2009. - SE4030.

Santarek K. and Buseif M. Modeling and design manufacturing systems using SADT and Petri nets tools [Article] // Journal of material processing technology. - 1998. - Vol. 76.

Siegel Robert et Howell John R. Thermal Radiation Heat Transfer - second edition [Livre]. - [s.l.] : McGraw-Hill Book Company, 1981.

Talon Aurélie Evaluation des scénarii de dégradation des produits de construction // Thèse de doctorat. - Clermont-Ferrand : Université Blaise Pascal, 2006.

Tewarson A., Jiang F. H. et Morikawa T. Ventilation-Controlled combustion of Polymers [Revue] // Combustion and flame. - 1993. - Vol. 95. - pp. 151-169.

The Geneva Association World Fire Statistics [Online] // Information Bulletin on the World Fire Statistics Centre. - 25 10 2009. - 25 06 2010. - <http://genevaassociation.org/PDF/WFSC/GA2009-FIRE25.pdf>.

Théos Constantin Modélisation du Mouvement des Personnes lors de l'Evacuation d'un Bâtiment à la Suite d'un Sinistre // Thèse de Doctorat. - Paris : Ecole Nationale Supérieure des Ponts et Chaussées, 1994.

Thibaut Olivier Contribution au Développement d'une Méthode Globale d'Analyse des Risques sur un Territoire [Rapport]. - Mulhouse : Université de Haute-Alsace, 2007.

Thibaut Olivier et Brilhac Jean-François Analyse des Risques sur un Territoire [Article] // Technique de l'Ingénieur. - 2009. - AG1586.

Thiry L. et Thirion B. Functional metamodels for systems and software [Article] // Journal of Systems and Software. - 2009. - Vol. 82(7).

Thiry L. et Thirion B. Une interprétation fonctionnelle de l'IDM [Article] // Technique et Science Informatiques. - 2010. - Vol. 29.

Université de Bordeaux Portail du risque QHSE [En ligne] // Problématique, Méthodologie, Science du danger. - 2010. - <http://portaildurisque.iut.u-bordeaux1.fr/promethScienceDanger.htm>.

Utiskul Y. et Quintiere J. G. An Application of Mass Loss Rate Model with Fuel Response Effects in Fully-Developed Compartment Fires [Conférence] // Proceedings of the Ninth International Symposium of Fire Safety Science. - 2008.

Utiskul Yonyong Theoretical and experimental study on fully-developed compartment fires // PhD Thesis. - Baltimore : University of Maryland, 2006.

Villani Emilia, Valette Robert and Miyagi Paulo Modelling and Analysis of Hybrid Supervisory Systems - A Petri Net Approach [Book]. - London : Springer, 2007.

Villemeur A. Sureté de fonctionnement des systèmes industriels [Livre]. - Paris : Eyrolles, 1988.

Von Bertalanffy Ludwig Théorie Générale des Systèmes [Livre]. - Paris : Dunod, 1993.

Yung D.T., Hadjisophocleous G.V. and Proulx G. A Description of the probabilistic and deterministic modelling used in FiRECAM [Article] // International Journal on Engineering Performance-Based Fire Codes, p.18-26. - 1999. - Vol. 1.

Zaytoon Janan Systèmes Dynamiques Hybrides [Livre]. - Paris : Hermes Science, 2001.

Zukoski E.E. [Conférence] // Fire Safety Science - Proceedings of the First International Symposium. - New York : Hemisphere, 1984.

ANNEXES

ANNEXE 1: MODÈLE PHYSIQUE CIFI 2009	187
I. MODÈLE AÉRAULIQUE À DEUX ZONES GAZEUSES	187
I.A Rappel de l'hypothèse de découpage en deux zones	187
I.B Variables de base	187
I.C Système d'équations	187
I.D Variables déduites	188
I.E Nomenclature	188
II. CALCUL DES TERMES DE FLUX PROVENANT DES DIFFÉRENTS OBJETS DU SYSTÈME « BÂTIMENT EN FEU »	189
II.A Parois des locaux	189
II.B Ouvertures verticales	190
II.C Systèmes de désenfumage	191
II.D Foyers	191
III. MODÈLE DE RAYONNEMENT	193
III.A Propriétés radiatives des zones gazeuses	193
III.B Rayonnement de la flamme	193
III.C Échanges radiatifs à 2 parois	193
ANNEXE 2: PRÉSENTATION DÉTAILLÉE DE LA DÉMARCHÉ DE CONSTRUCTION DE RÉSEAUX DE PETRI	195
I. CONSTRUCTION DES PLACES	195
I.A Partie représentant le déplacement de l'objet	195
I.B Partie(s) représentant le rôle de l'objet dans la propagation de l'alerte	196
I.C Partie(s) représentant les interactions continues de l'objet avec le modèle aéraulique	196
I.D Partie représentant les actions de l'objet sur les autres objets	198
I.E Partie représentant la dégradation de l'objet	198
II. IDENTIFICATION DES TRANSITIONS ET DES ARCS	199
II.A Parties représentant le déplacement de l'objet et les effets de sa dégradation sur son déplacement	199
II.B Parties représentant le rôle de l'objet dans la propagation de l'alerte et les effets de sa	
dégradation sur ce rôle	201
II.C Partie(s) représentant les actions de l'objet sur les autres objets	203
II.D Parties représentant les interactions continues de l'objet avec le modèle aéraulique et les effets de	
la dégradation de l'objet sur ces interactions	204
III. DISTINCTION ENTRE LES TRANSITIONS ACTIVES, PASSIVES ET INTERNES	207
IV. SIMPLIFICATIONS DE LA STRUCTURE DU RÉSEAU ÉLÉMENTAIRE	209
IV.A Simplifications du nombre de transitions	209
IV.B Simplification du nombre de places	209
V. IDENTIFICATION DE L'ÉTAT INITIAL ET AJOUT DES TRANSITIONS D'INITIALISATION	210
V.A Identification de l'état initial	210
V.B Concaténation des différentes parties	210
VI. IDENTIFICATION DES VARIABLES NÉCESSAIRES	211
VI.A Variables générales liées à tout objet	211
VI.B Variables liées aux transitions d'initialisation de l'état initial	211
VI.C Variables liées au calcul des échanges de masse et d'énergie entre un objet et les zones gazeuses	
211	
VI.D Variables liées au calcul de l'absorption et de la diffusion d'énergie dans un objet solide	212
VI.E Variables liées aux signaux de danger	212
VI.F Variables liées aux processus d'action	213
VII. CONSTRUCTION DES CONDITIONS DE SENSIBILISATION	214
VII.A Transitions d'initialisations	215

VII.B	Transitions servant à calculer l'absorption et la diffusion d'énergie dans l'objet solide	215
VII.C	Transitions représentant une création d'information	215
VII.D	Transitions représentant un processus d'action inhibé	216
VII.E	Transitions représentant un processus d'action inhibiteur	216
VII.F	Autres transitions	217
VIII.	CONSTRUCTION DES FONCTIONS DE JONCTION	217
VIII.A	Transitions d'initialisations.....	218
VIII.B	Transitions servant à calculer l'absorption et la diffusion d'énergie dans l'objet solide	218
VIII.C	Transitions représentant un processus d'action inhibiteur	219
VIII.D	Autres transitions	219
IX.	CONSTRUCTION DES FONCTIONS CONTINUES	220
X.	RÉPARTITION DES VARIABLES EN CATÉGORIES ET INITIALISATION DE LEUR VALEUR	221
XI.	VÉRIFICATION ET SIMPLIFICATION DES ANNOTATIONS DU RÉSEAU	221
XI.A	Vérification	221
XI.B	Simplifications des annotations.....	223
ANNEXE 3: QUELQUES RÉSEAUX DE PETRI DE L'APPLICATION PRATIQUE.....		225
I.	RÉSEAU DE PETRI ÉLÉMENTAIRE REPRÉSENTANT LA PORTE DU STUDIO SINISTRÉ.....	225
I.A	Structure et marquage initial.....	225
I.B	Annotations	226
I.C	Nomenclature et valeurs initiales des variables	226
II.	RÉSEAU DE PETRI ÉLÉMENTAIRE REPRÉSENTANT L'OCCUPANT DU STUDIO SINISTRÉ	227
II.A	Structure et marquage initial	227
II.B	Annotations.....	228
II.C	Nomenclature et valeurs initiales des variables	229
III.	RÉSEAU DE PETRI ÉLÉMENTAIRE REPRÉSENTANT LA FENÊTRE DU STUDIO SINISTRÉ.....	230
III.A	Structure et marquage initial	230
III.B	Annotations.....	231
III.C	Nomenclature et valeurs initiales des variables	231

Annexe 1: MODÈLE PHYSIQUE CIFI 2009

Cette annexe synthétise et reprend les équations d'un rapport interne au CSTB (Demouge, et al., 2010). L'objectif de cette annexe est de présenter les équations de l'outil CIFI 2009. Les hypothèses de bases de l'outil sont présentées dans le premier chapitre.

I. MODÈLE AÉRAULIQUE À DEUX ZONES GAZEUSES

I.A Rappel de l'hypothèse de découpage en deux zones

CIFI 2009 est un outil numérique se basant sur un modèle appartenant à la famille des modèles dits « de zones ». Dans un tel modèle, l'espace d'un bâtiment est découpé en zones, dans lesquels les grandeurs physiques caractéristiques du modèles (p. ex. : température, composition des espèces chimiques, opacité, etc.) sont uniformes et instationnaires.

L'idée de découper l'espace en zones vient de l'observation que les gaz chauds issus d'un foyer s'accumulent sous le plafond d'un local en présentant une frontière basse à peu près horizontales avec l'air frais situé au-dessous. Ceci est valable pour des locaux de forme géométrique classique, des parallélépipèdes rectangles, et pour des foyers placés en partie basse du local et assez puissants par rapport aux dimensions du local (sinon, la fumée vite refroidie dans son ascension se répartit en volutes ou lentilles) et en l'absence de « courants d'air » importants.

De cette manière, dans un modèle à deux zones gazeuses comme CIFI 2009, l'espace volumique gazeux d'un local est composé de deux zones : l'une chaude, en haut et l'autre plus froide, en bas. L'interface entre les deux zones est une surface virtuelle traversée par endroit par des flux de masse et d'enthalpie dus aux foyers. La hauteur de cette interface, dite « hauteur d'interface thermique » ou « hauteur libre de fumée »

I.B Variables de base

Le modèle s'appuie sur des bilans de conservation de masse et d'énergie dans chacune des deux zones d'un local i . Les variables de base choisies pour écrire ces bilans de conservation sont les suivantes :

ΔP_N^i	Écart par rapport à la pression de référence de la pression au sol dans le local (ramenée à l'altitude de référence) normalisée par la pression de référence
V_{ZB}^i	Volume de la zone basse normalisé par le volume du local
m_{ZH}^i	Masse de la zone haute
m_{ZB}^i	Masse de la zone basse
m_{kZH}^i	Masse de l'espèce k dans la zone haute
m_{kZB}^i	Masse de l'espèce k dans la zone basse

I.C Système d'équations

Le système d'équations différentielles ordinaire à résoudre est le suivant :

$$\frac{d\Delta P_N^i}{dt} = \frac{\gamma - 1}{P_0 V^i} (\dot{E}_{ZH}^i + \dot{E}_{ZB}^i)$$

$$\frac{dV_{ZB_N}^i}{dt} = \frac{1}{\gamma P_0 (1 - \Delta P_N^i)} \left[\frac{(\gamma - 1)}{V^i} \dot{E}_{ZB}^i - P_0 V_{ZB_N}^i \frac{d\Delta P_N^i}{dt} \right]$$

$$\frac{dm_{ZH}^i}{dt} = \dot{m}_{ZH_{in}}^i - \dot{m}_{ZH_{out}}^i$$

$$\frac{dm_{ZB}^i}{dt} = \dot{m}_{ZB_{in}}^i - \dot{m}_{ZB_{out}}^i$$

$$\frac{dm_{kZH}^i}{dt} = \dot{m}_{kZH_{in}}^i - \dot{m}_{kZH_{out}}^i$$

$$\frac{dm_{kZB}^i}{dt} = \dot{m}_{kZB_{in}}^i - \dot{m}_{kZB_{out}}^i$$

Ce système d'équation dérive de bilans de conservation de la masse et de l'énergie ainsi que du premier principe de la thermodynamique. Les termes utilisés sont définis dans la nomenclature (cf. I.E).

I.D Variables déduites

Les variables décrivant l'état des zones gazeuses (pression, interface thermique entre zones, températures, fractions massiques des espèces chimiques) sont déduites des variables principales en résolvant les équations suivantes

$$\Delta P^i = P_0 \times \Delta P_N^i$$

$$Z_{int}^i = V_{ZB_N}^i \times H^i$$

$$T_{ZH}^i = \frac{(P_0 + \Delta P^i)(1 - V_{ZB_N}^i)V^i}{r m_{ZH}^i}$$

$$T_{ZB}^i = \frac{(P_0 + \Delta P^i)(V_{ZB_N}^i)V^i}{r m_{ZB}^i}$$

$$Y_{kZH}^i = \frac{m_{kZH}^i}{m_{ZH}^i}$$

$$Y_{kZB}^i = \frac{m_{kZB}^i}{m_{ZB}^i}$$

Ces équations ont été obtenues en faisant intervenir l'hypothèse de gaz parfait. Les termes utilisés sont définis dans la nomenclature (cf. I.E).

I.E Nomenclature

I.E.a) Variables utilisées pour décrire les zones de gaz

g	Accélération gravitationnelle
C_p	Chaleur spécifique de l'air à pression constante
ΔP^i	Écart de pression au sol ramené à l'altitude de référence

ΔP_N^i	Écart de pression normalisé
γ	$\gamma = C_p/C_v$
m_{ZH}^i	Masse de la zone haute
m_{ZB}^i	Masse de la zone basse
m_{kZH}^i	Masse de l'espèce k en zone haute
m_{kZB}^i	Masse de l'espèce k en zone basse
P_0	Pression de référence
r	Constante universelle des gaz parfaits
R_u	Constante universelle des gaz parfaits
T_{ZH}^i	Température de zone haute
T_{ZB}^i	Température de zone basse
V_{ZBN}^i	Volume de la zone basse normalisé par le volume du local
Y_{kZH}^i	Fraction massique de l'espèce k en zone haute
Y_{kZB}^i	Fraction massique de l'espèce k en zone basse
Z_{int}^i	Hauteur d'interface thermique

I.E.b) Variables utilisées pour décrire les flux de masse et d'énergie

$\dot{E}_{ZH}^i$	Flux net d'énergie en zone haute
$\dot{E}_{ZB}^i$	Flux net d'énergie en zone basse
$\dot{m}_{ZH\text{in}}^i$	Flux de masse entrant en zone haute
$\dot{m}_{ZH\text{out}}^i$	Flux de masse sortant de la zone haute
$\dot{m}_{ZB\text{in}}^i$	Flux de masse entrant en zone basse
$\dot{m}_{ZB\text{out}}^i$	Flux de masse sortant de la zone basse
$\dot{m}_{kZH\text{in}}^i$	Flux de masse de l'espèce k entrant en zone haute
$\dot{m}_{kZH\text{out}}^i$	Flux de masse de l'espèce k sortant de la zone haute
$\dot{m}_{kZB\text{in}}^i$	Flux de masse de l'espèce k entrant en zone basse
$\dot{m}_{kZB\text{out}}^i$	Flux de masse de l'espèce k sortant de la zone basse

II. CALCUL DES TERMES DE FLUX PROVENANT DES DIFFÉRENTS OBJETS DU SYSTÈME « BÂTIMENT EN FEU »

Les termes de flux de masse ($\dot{m}$) et d'énergie ($\dot{E}$) apparaissant dans les termes de droite du système d'EDO du système d'équation présenté en partie I.C sont générés par les différents objets du système « bâtiment en feu » (parois des locaux, ouvertures, systèmes de désenfumage, foyers, etc.).

Ces termes sont modélisés en ayant recours à des représentations simplifiées des phénomènes (corrélations empiriques, application du théorème de Bernoulli, etc.). Ces représentations sont détaillées ci-après.

II.A Parois des locaux

Les parois sont décrites par la géométrie du local (largeur, longueur, hauteur) et son altitude, leur épaisseur, leurs caractéristiques thermo-physiques et leur émissivité. Seulement deux parois sont considérées pour chaque local :

- la paroi haute (au contact de la zone haute) ;

- la paroi basse (au contact de la zone basse).

Les surfaces de ces deux parois évoluent donc proportionnellement à la hauteur d'interface dans le local.

Les échanges de chaleur convectif et radiatif (le modèle de rayonnement utilisé est présenté en partie III) entre le milieu gazeux et une paroi sont fonction de la température de la face exposée de cette dernière. Pour évaluer au cours du temps la température de surface des parois des locaux, un modèle unidimensionnel de conduction de la chaleur est utilisé. Chaque paroi est discrétisée en 19 éléments finis pour réaliser le calcul de conduction de la chaleur. L'influence du local sollicitant éventuellement la face non-exposée est négligée.

Remarque :

Dans ce modèle, la surface des ouvertures verticales est déduite de la surface des parois lors de l'évaluation du flux total échangé entre le gaz et la paroi.

II.B Ouvertures verticales

Une ouverture verticale est décrite par ses hauteurs d'allège et de linteau, sa largeur, les deux locaux qu'elle relie et son coefficient aéraulique.

Le calcul des flux de masse et d'enthalpie échangés entre les zones de deux locaux reliés par une ouverture verticale reprend celui implémenté dans les versions précédentes de CIFI. Le principe retenu est décrit et expliqué de façon détaillée à la page 86 de (Bodart, 1990).

En deux mots, une première étape consiste à appliquer le théorème de Bernoulli sur la hauteur de l'ouverture, en tenant ainsi compte de l'écart de pression au sol des deux locaux ainsi que des masses volumiques des quatre zones en contact et des deux hauteurs d'interface. On obtient ainsi après intégration les débits massiques échangés entre les différentes zones.

Dans une deuxième étape, les débits obtenus sont redirigés vers l'une ou l'autre des zones du local dans lequel ils débouchent en tenant compte de la différence de masse volumique entre l'écoulement à l'ouverture et la zone. Par exemple, un écoulement de gaz chaud (froid) débouchant dans une zone froide (chaude) sera redirigé vers le haut (vers le bas). Différents cas peuvent se présenter et l'on ne vise pas ici à les détailler de façon exhaustive. Lorsqu'un écoulement est redirigé, l'entraînement généré (formation d'un « panache d'ouverture ») est calculé à l'aide de corrélations empiriques en faisant une analogie avec le cas d'un panache axisymétrique. Par défaut, la corrélation de (McCaffrey, 1979) est utilisée. Cette analogie est systématiquement réalisée, que le panache soit ascendant ou descendant.

En sus des échanges de masse et d'enthalpie, les pertes par rayonnement aux ouvertures peuvent jouer un rôle très important sur les températures atteintes. En pratique, une évaluation des échanges radiatifs entre deux locaux via une ouverture verticale cohérente avec la représentation en deux zones gazeuses est ardue : les facteurs de forme entre les différentes couches et les différentes parois des deux locaux ne sont pas simples à exprimer. L'approche retenue au stade actuel de développement de l'outil consiste à écrire l'échange entre les deux zones hautes seules ou les deux zones basses seules en considérant un facteur de forme égal à 1, une émissivité égale à 1 et une surface d'échange égale à la surface de contact entre les deux zones considérées.

II.C Systèmes de désenfumage

L'outil permet la prise en compte de la mise en œuvre de systèmes d'évacuation naturelle ou mécanique de la fumée via la représentation des flux de masse et d'enthalpie générés par la présence d'exutoires ou de bouches mécaniques.

II.C.a) Exutoire

Un exutoire est toujours placé au plafond d'un local et est décrit par une surface géométrique et un coefficient aéraulique. Le débit volumique obtenu au niveau de l'exutoire est généré par le différentiel de pression entre le local i et l'environnement du système (l'extérieur).

II.C.b) Bouche mécanique

Une bouche mécanique peut être placée à n'importe quelle hauteur dans un local. Elle est caractérisée par un débit volumique (positif, alors il s'agit d'une bouche de soufflage, ou négatif, alors il s'agit d'une bouche d'extraction).

II.C.c) Phénomènes non souhaités nuisant à l'efficacité du désenfumage

Poinçonnement

Si l'écoulement à travers un dispositif d'évacuation est élevé et la couche de fumée mince, l'extraction d'air peut s'accompagner d'un entrainement parasite d'air non enfumé (venant de la zone basse sous la fumée). Cet entrainement parasite, également appelé phénomène de poinçonnement ou plugholing en anglais, nuit à l'efficacité du désenfumage. Le critère de poinçonnement implémenté dans l'outil a été proposé par (Curtat, 2002).

Brassage entre zones

Le soufflage d'air entraine un brassage entre les zones si l'écoulement d'air frais en provenance de l'extérieur entrant pénètre dans la zone haute. L'outil prend ce brassage en compte en redirigeant vers la zone basse le débit de soufflage en tenant compte d'un entrainement de fluide de la zone haute calculé à l'aide de la corrélation de (McCaffrey, 1979).

II.D Foyers

Un foyer est décrit par :

- une surface horizontale circulaire placée à une certaine hauteur dans le local,
- une température de vaporisation,
- une chaleur latente apparente de vaporisation,
- une évolution temporelle du débit de pyrolyse
- une réaction de combustion.

L'activité du foyer diffère selon que le foyer est bien ventilé (excès de comburant ou stœchiométrie) ou mal ventilé (excès de combustible). Pour connaître la situation de ventilation du foyer, la richesse du mélange gazeux le constituant est utilisée.

II.D.a) Débit calorifique

Le débit calorifique diffère alors en fonction de la richesse du mélange.

Dans le cas d'un excès de combustible, le débit calorifique est calculé comme suit :

$$\dot{Q} = \dot{m}_p \cdot h_c$$

Avec :

$\dot{m}_p$: le débit de pyrolyse (cf. II.D.c)

h_c : l'enthalpie de combustion d'un kg de combustible

Dans le cas d'un excès de comburant, le débit calorifique est calculé comme suit :

$$\dot{Q} = Y_{O_2_{ZB}} \cdot \dot{m}_{ent} \cdot h_{c_{O_2}}$$

Avec :

$Y_{O_2_{ZB}}$: la fraction massique d'oxygène dans la zone basse

$\dot{m}_{ent}$: le débit entrainé par le panache de la zone basse vers la zone haute

$h_{c_{O_2}}$: l'enthalpie de combustion d'un kg de comburant

Par défaut, $\dot{m}_{ent}$, le débit massique entrainé de la zone basse vers la zone haute par le panache se développant au droit du foyer est calculé en fonction du débit calorifique et de la distance séparant la surface horizontale représentant le foyer de l'interface entre zone haute et zone basse à l'aide de la corrélation empirique de (McCaffrey, 1979) .

II.D.b) Réaction de combustion

Foyer bien ventilé

En situation de feu bien ventilé, la réaction de combustion est décrite par le nombre d'atomes de carbone, d'hydrogène et d'oxygène présents dans le gaz issu de la pyrolyse, par les fractions de masse de combustible converties après oxydation en suie et en monoxyde de carbone ainsi que par la chaleur dégagée par la combustion d'un kilogramme de dioxygène. L'outil déduit de ces données d'entrée les termes de production des différentes espèces chimiques et la chaleur de combustion associée au combustible considéré (les suies sont considérées comme composées de carbone uniquement).

Foyer mal ventilé

Lorsque le foyer est mal ventilé, la réaction complète ne peut pas avoir lieu. Il en découle :

- qu'une plus grande production de suie et de monoxyde de carbone ;
- que le combustible imbrulé dans la zone de flamme est convectée dans la couche de fumée sous la forme

Les corrélations empiriques établies par (Tewarson, et al., 1993) sont utilisées pour augmenter la production de suie et de monoxyde de carbone.

Par défaut, le combustible imbrûlé est simplement injecté en zone haute où il pourra réagir avec l'oxygène présent ou être transporté dans une autre zone.

II.D.c) Débit de pyrolyse

Le débit de pyrolyse est l'une des données d'entrée du foyer. Toutefois, les conditions régnant dans le local sont susceptibles d'influencer fortement le débit de pyrolyse libéré par un objet en feu et ce dernier peut être très éloigné de celui que l'on obtiendrait si l'objet était placé en champ libre.

La sous-ventilation du foyer (excès de combustible) réduit le retour radiatif provenant de la flamme sur la surface en pyrolyse active (réduisant d'autant l'énergie servant à la dégradation

du matériau) tandis que l'élévation de température dans le local augmente l'énergie utilisable par la pyrolyse.

Le modèle de perte de masse que implémenté dans l'outil pour prendre en compte ces effets a été proposé par (Utiskul, 2006). Ce modèle a été implémenté dans un modèle de feu à une zone (Utiskul, et al., 2008) ainsi que dans le modèle à deux zones BRI2002 (Mizukami, et al., 2008) et a fait l'objet de confrontation à des expériences à petite échelle.

III. MODÈLE DE RAYONNEMENT

Le modèle de rayonnement implémenté dans l'outil reprend celui utilisé dans les versions précédentes de CIFI (Bodart, 1990; Morin, 2005).

III.A Propriétés radiatives des zones gazeuses

Les propriétés radiatives sont celles d'un **corps gris**. Les propriétés radiatives du milieu gazeux sont **uniformes sur toute la longueur du spectre**. De plus, il est considéré que **l'émissivité** et que **l'absorptivité** d'une zone gazeuse sont **égales**. Enfin, seule la contribution de la suie aux propriétés radiatives du milieu gazeux. Par conséquent, l'influence des autres espèces gazeuses et des gouttelettes d'eau est négligée.

Enfin, l'émissivité de la zone gazeuse est calculée à l'aide d'un coefficient d'atténuation et de la longueur de la zone. Le calcul du coefficient d'atténuation varie en fonction de la pression du local, de la température de la zone et de la fraction massique de suie.

III.B Rayonnement de la flamme

Lorsqu'un foyer se trouve dans un local, la flamme dispense une certaine fraction de sa puissance (environ 30%) sous forme de rayonnement. Cette fraction porte le nom de fraction rayonnée. Dans le modèle de CIFI 2009, **seule la fraction rayonnée par la portion de la flamme se situant dans la zone basse est considérée**. Le rayonnement de la portion de la flamme se situant dans la zone haute est donc négligé.

Pour connaître chaque portion de flamme, la hauteur d'interface thermique et la hauteur de flamme sont comparées. La hauteur de flamme est calculée par la corrélation empirique de (Zukoski, 1984). La hauteur d'interface thermique est l'une des variables déduites du modèle aérodynamique (cf. I.D).

La puissance rayonnée est donc calculée en fonction de **la portion de la flamme se situant dans la zone basse** et de **la fraction rayonnée**. Cette puissance est ensuite répartie vers les parois hautes et basses.

III.C Échanges radiatifs à 2 parois

On assimile les zones haute et basse à **deux hémisphères**. Des calculs simples sont alors utilisés pour évaluer les facteurs de forme entre les zones gazeuses haute et basse et les parois haute et basse (Siegel, et al., 1981). On considère par ailleurs que l'émissivité et l'absorptivité d'une paroi sont égales.

Annexe 2: PRÉSENTATION DÉTAILLÉE DE LA DÉMARCHE DE CONSTRUCTION DE RÉSEAUX DE PETRI

Cette annexe a pour objectif la présentation détaillée de la démarche de construction de réseaux de Petri. Elle reprend donc les onze phases de construction identifiées au chapitre.... Afin de rendre la démarche plus compréhensible, les différentes phases sont illustrées par des exemples. Les exemples retenus sont ceux des trois réseaux du quatrième chapitre, c'est-à-dire le réseau représentant le ferme-porte (cf. Figure 62, dans le quatrième chapitre), le réseau représentant l'occupant (cf. Figure 63, dans le quatrième chapitre) et le réseau représentant la porte (cf. Figure 64, dans le quatrième chapitre). De nombreux renvois vers ces figures sont ménagés tout au long de cette annexe.

I. CONSTRUCTION DES PLACES

I.A Partie représentant le déplacement de l'objet

Si l'objet se déplace, alors il s'agit d'un individu et ses déplacements sont représentés dans la vue mouvement de personne du modèle systémique. Pour modéliser ces déplacements, il faut **autant de places que de boîtes pouvant contenir l'élément « personne étudiée »**. À un instant t , le marquage indique l'endroit dans lequel la personne est.

Exemple : déplacement de l'occupant

La Figure 85 représente la vue mouvement de personnes de la trame du quatrième chapitre. La lecture de cette vue indique que l'occupant peut potentiellement aller dans trois endroits différents au cours d'un scénario : la chambre, le couloir et l'environnement. En conséquent, le réseau de Petri résultant est composé de **trois places** : une pour la chambre, une pour le couloir et une pour l'environnement. La Figure 86 illustre cet exemple, avec un marquage indiquant que l'occupant est dans la chambre. Pour une meilleure compréhension, nous avons conservé la même numérotation des places que dans l'exemple du quatrième chapitre (cf. la Figure 63).

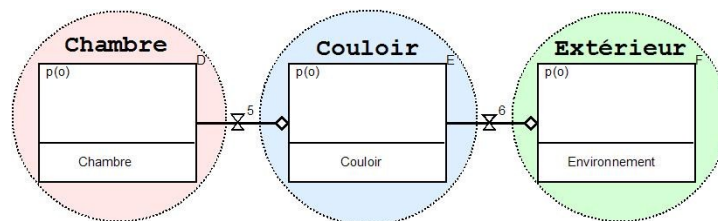


FIGURE 85 : L'OCCUPANT DANS LA VUE MOUVEMENT DE PERSONNE

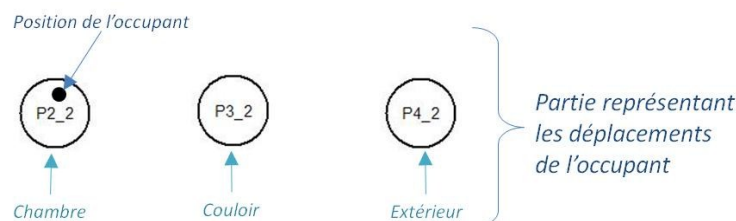


FIGURE 86 : PLACES NÉCESSAIRES POUR REPRÉSENTER LE DÉPLACEMENT DE L'OCCUPANT

I.B Partie(s) représentant le rôle de l'objet dans la propagation de l'alerte

Si l'objet peut être alerté ou créer un message d'alerte, alors il apparaît comme une boîte dans la vue information. Dans ce cas, il faut une partie de réseau pour représenter son état d'alerte (resp. de création d'alerte). Dans cette partie, il faut toujours **deux places**, l'une signifiant que l'objet n'est pas encore alerté (resp. n'a pas créé l'alerte), l'autre qu'il l'est (resp. qu'il l'a créée).

Exemple : état d'alerte de l'occupant

La Figure 87 représente la vue information de la trame du quatrième chapitre. Cette vue indique que l'occupant peut potentiellement être alerté par l'avertisseur sonore. Il en découle que le RDPE représentant l'occupant doit contenir deux places représentant l'état d'alerte de cet occupant. La Figure 88 illustre les places obtenues pour cet exemple. Le marquage indique que l'occupant ignore la présence de l'incendie dans l'établissement.

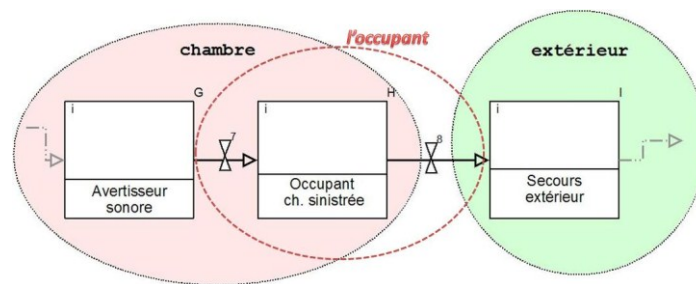


FIGURE 87 : L'OCCUPANT DANS LA VUE INFORMATION

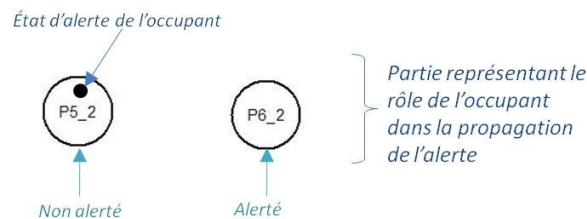


FIGURE 88 : PLACES NÉCESSAIRES POUR REPRÉSENTER L'ÉTAT D'ALERTE DE L'OCCUPANT

I.C Partie(s) représentant les interactions continues de l'objet avec le modèle aéraulique

Lorsqu'un objet entretient des interactions continues avec le modèle aéraulique (p. ex. : ce qui est le cas pour une porte), il apparaît dans la vue physique, au moins par une vanne, au plus par un ensemble de vannes et de boîtes. Dans tous les cas, il faut au **moins une partie de réseau** pour représenter ces interactions continues. Selon le nombre et la nature des interactions, il peut y avoir plusieurs parties de ce type pour un même objet.

Pour construire une telle partie, il faut tout d'abord identifier **toutes les vannes représentant l'objet qui subissent les mêmes processus d'action et qui ont la même position initiale**. Cela signifie que ces vannes ont toujours la même position au cours du scénario et qu'une même partie de réseau est suffisante pour représenter leurs mouvements.

Exemple : interaction entre la porte et le modèle aéraulique

Par exemple, dans la vue physique de la trame du quatrième chapitre, la porte est représentée par quatre vannes et par une boîte (cf. figure ci-dessous) :

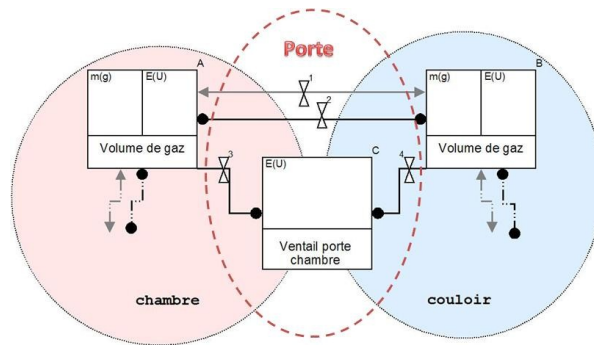


FIGURE 89 : LA PORTE DANS LA VUE PHYSIQUE

En cherchant quelles vannes subissent les mêmes processus d'action, deux groupes de vannes sont trouvés :

- d'une part, les vannes V1 et V2 subissent les quatre mêmes processus d'action, c'est-à-dire les PA n°1 (ouverture de la porte par l'occupant), n°2 (fermeture de la porte par le ferme-porte), n°3 (ruine thermique de la porte) et n°4 (destruction de la porte par les secours) ;
- d'autre part, les vannes V3 et V4 servant à commander le flux incident sur le ventilateur, ne subissent aucun processus d'action.

Les vannes **V1 et V2** vont donner la partie de réseau composée des places **P_{2,2}, P_{3,3} et P_{4,3}** et les vannes **V3 et V4** la partie composée de la place **P_{8,3}** (cf. Figure 64).

Ensuite, il faut poser **une place pour chaque état d'ouverture de vanne(s)**. En d'autres termes, il faut poser autant de places que la (les) vanne(s) a (ont) de degré(s) de liberté⁶².

Exemple : interaction entre la porte et le modèle aéraulique

Par exemple, les deux vannes **V1 et V2** ont **deux degrés de liberté**, puisque la porte peut-être soit totalement ouverte (dans ce cas V1 et V2 sont ouvertes), soit totalement fermée (dans ce cas V1 et V2 sont fermées). Il en découle que la partie de réseau représentant les mouvements de ces deux vannes doit contenir **deux places** : l'une pour l'état fermée et l'autre pour l'état ouvert. La Figure 90 illustre les places obtenues. Par ailleurs, le marquage indique que la porte est fermée.

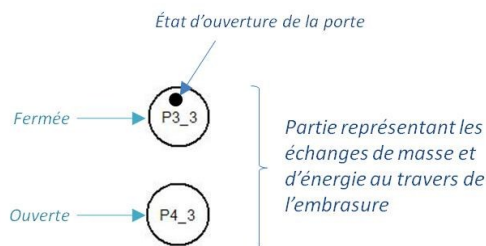


FIGURE 90 : PLACES NÉCESSAIRES POUR REPRÉSENTER L'IMPACT DE LA POSITION DE LA PORTE SUR LES ÉCHANGES DE MASSE ET D'ÉNERGIE AU TRAVERS DE L'EMBRASURE

Remarque :

À ce stade, la place P2_2 n'est pas encore ajoutée. Elle le sera au paragraphe V

⁶² Rappel : le degré de liberté d'une vanne, défini au troisième chapitre, indique le nombre de positions que peut prendre la vanne au cours des scénarios.

Par ailleurs, les deux vannes **V3 et V4** n'ont qu'un **degré de liberté**, puisque ces vannes sont toujours ouvertes. Cela signifie que, dans ce modèle de comportement de la porte, le flux thermique incident sur le ventail n'est pas dépendant de l'état de la porte et ce qu'elle soit ouverte, fermée, intacte ou détruite. Il n'y a qu'une **seule place** impliquée : $P_{8,3}$

I.D Partie représentant les actions de l'objet sur les autres objets

Lorsqu'un objet agit sur un autre objet, et que cette action est différente d'un transfert de message, il faut construire une partie de réseau pour représenter cette action.

Pour chaque action de l'objet sur les autres objets, il faut :

- une place si l'action est répétable dans un scénario ;
- deux places si l'action est ponctuelle : l'une signifiant que l'action n'a pas encore commencée et l'autre que l'action est finie.

Remarque :

D'une manière générale, une action est répétable si le processus d'action qui la modélise apparaît plus d'une fois dans l'arbre d'enchaînement des processus d'action (cf. troisième chapitre).

Exemple : la fermeture de la porte par le ferme-porte

Dans la trame définie au quatrième chapitre, l'action du ferme-porte est répétable (cf. PA n°2 dans la Figure 61). En effet, elle peut survenir dès le début d'un scénario (si la porte est initialement ouverte) et après l'ouverture de la porte par l'occupant. En conséquent, une seule place est nécessaire, comme c'est le cas pour la place $P_{2,1}$ de la Figure 62.

Exemple : ouverture de la porte par l'occupant

L'occupant, lorsqu'il sort, ouvre la porte (cf. PA n°1). Il ne réalise cette action qu'une seule fois dans la trame, ce qui en fait une action ponctuelle. Par conséquent, deux places sont nécessaires : l'une indiquant qu'il n'a pas encore ouvert la porte (cf. la place $P_{9,2}$ de la Figure 63), et l'autre qu'il l'a déjà fait (cf. la place $P_{10,2}$ de la Figure 63).

I.E Partie représentant la dégradation de l'objet

Par défaut, il faut toujours poser deux places pour l'éventuelle dégradation de l'objet. S'il se révèle, au cours de la construction du RDPE, que l'objet est infaillible, alors ces deux places, devenues inutiles, seront éliminées lors de la phase de simplification (cf. IV.B. Parmi ces deux places, l'une signifie que l'objet est intact, l'autre qu'il est dégradé. Lorsqu'il est dégradé, l'objet ne fonctionne plus comme prévu, et certaines de ses actions sont inhibées. Par ailleurs, cette dégradation est permanente. L'ajout de dégradation temporaire constitue un axe d'amélioration de la démarche de la méthode ISI-Systema.

Exemple : décès de l'occupant

Par défaut, pour l'occupant, il faut poser les deux places suivantes :

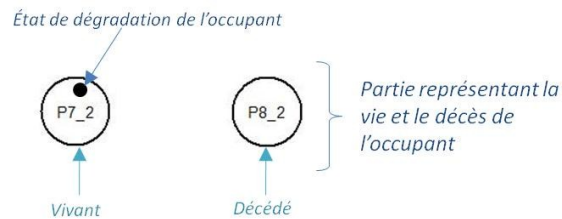


FIGURE 91 : PLACES NÉCESSAIRES POUR REPRÉSENTER LE DÉCÈS DE L'OCCUPANT

Exemple : ruine de l'occupant

De la même manière, pour la porte, il faut poser les deux places suivantes :

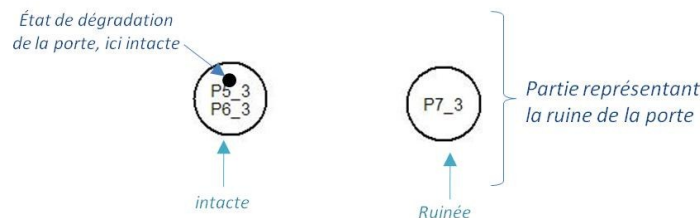


FIGURE 92 : PLACES NÉCESSAIRES POUR REPRÉSENTER LA RUINE DE LA PORTE

A ce stade de la construction, les futures places $P_{5,3}$ et $P_{6,3}$ sont encore regroupées en une seule. La séparation aura lieu dans le paragraphe XI.A, lors de la résolution des conflits effectifs, dont la définition est proposée au premier chapitre.

II. IDENTIFICATION DES TRANSITIONS ET DES ARCS

II.A Parties représentant le déplacement de l'objet et les effets de sa dégradation sur son déplacement

II.A.a) Trouver le nombre de transition et d'arcs

Pour construire cette partie de réseau, il faut tout d'abord chercher **tous les processus d'action** qui ont pour cibles les vannes situées sur les flux d'éléments « personnes étudiées ». Posons N_{PA} le nombre de processus d'action trouvés.

Exemple : déplacement de l'occupant

Dans la Figure 85, rappelant la vue mouvement de personnes, les deux vannes permettent de contrôler le flux de l'occupant : la vanne V5 et la vanne V6. Ces deux vannes sont les cibles des quatre processus d'action suivants : PA n°5, n°6, n°7 et n°8. Dans cet exemple, N_{PA} vaut donc 4.

Connaissant N_{PA} le nombre de processus d'action impactant les vannes, soient :

- N_t , le nombre de transition à créer pour représenter le déplacement de l'objet ;
- N_a , le nombre d'arc à créer pour représenter le déplacement de l'objet.

$$N_t = N_{PA}$$

$$N_a = 2.N_t$$

C'est-à-dire qu'il faut une transition pour chaque processus d'action préalablement identifié, et qu'il faut deux arcs par transitions.

II.A.b) Chercher si le déplacement peut être inhibé lors d'un scénario

Ensuite, il faut chercher dans la matrice d'interaction (cf. troisième chapitre) si l'un de ces N_{PA} processus d'action peut être inhibé par un autre des N_{PA} processus d'action.

Exemple :

Les PA n°5 et n°6 représentent le passage de l'occupant d'un endroit à un autre. Ces deux PA peuvent être inhibés par les PA n°7 et n°8, représentant le décès de l'occupant.

Dans ce cas, la représentation du déplacement de la personne, implique **à la fois l'utilisation des places représentant la position de l'objet**, construites au paragraphe I.A **et l'utilisation des deux places représentant la dégradation de l'objet**, construite au paragraphe I.E. Dans ce cas, il faut donc construire deux parties de RDPE en même temps.

II.A.c) Ajouter les transitions et les arcs

Enfin, après avoir ajouté les N_t transition représentant chacune un processus d'action, il faut les relier aux places. Pour y parvenir il est nécessaire de distinguer, parmi les N_{PA} processus d'action, ceux qui sont inhibiteurs de ceux qui ne le sont pas.

Les premiers sont ceux qui engendrent un blocage des vannes. Ils représentent des événements qui empêchent le déplacement (p. ex. : le décès). Les transitions représentant ces processus d'action sont ajoutées à la partie représentant la dégradation de l'objet et le sens des arcs les reliant aux places va dans le sens de la dégradation.

Les seconds engendrent simplement un mouvement des vannes et représentent donc le transfert de l'objet d'un endroit à un autre. Les transitions représentant ces processus d'action sont ajoutées à la partie représentant le déplacement de l'objet. Le sens des arcs les reliant aux places va dans le sens du déplacement.

Exemple : déplacement de l'occupant

Pour cet exemple, les places utiles ont déjà été définies en section I.A. Il convient d'y ajouter les transitions et les arcs. Pour y parvenir, il est nécessaire d'identifier les vannes étudiées ainsi que les processus d'action qui s'y rapportent. Sur cet exemple les vannes étudiées sont les vannes V5 et V6, et elles subissent 4 processus d'action. Ainsi, N_{PA} vaut ici 4.

En suivant les règles établies ci-avant, il faut construire autant de transitions et deux fois plus de places. Le réseau obtenu est celui de la Figure 93. La transition $T_{2,2}$ (en turquoise) correspond au processus d'action n°5 : sortie de l'occupant de la chambre. La transition $T_{3,2}$ (en marron) correspond au processus d'action n°6 : sortie de l'occupant du couloir. Les transitions $T_{6,2}$ (en rose) et $T_{6,2bis}$ (en vert) correspondent respectivement aux processus d'action n°7 et 8 : décès de l'occupant. Ces deux transitions ne sont pas encore fusionnées, comme c'est le cas dans le réseau final de la Figure 63. Cette fusion aura lieu au paragraphe IV.A. De plus, si elles sont tirées, ces transitions inhibent les transitions $T_{2,2}$ et $T_{3,2}$.

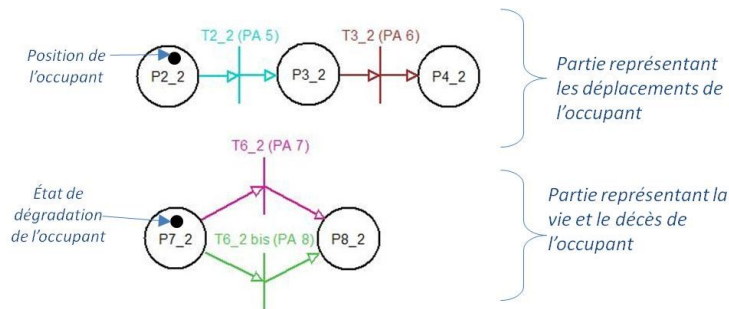


FIGURE 93 : IDENTIFICATION DES TRANSITIONS ET DES ARCS – DÉPLACEMENT DE L'OCCUPANT

Par ailleurs, les arcs vont :

- dans le sens du déplacement pour les transitions $T_{2,2}$ et $T_{3,2}$;
- dans le sens du décès pour les transitions $T_{6,2}$ et $T_{6,2bis}$.

II.B Parties représentant le rôle de l'objet dans la propagation de l'alerte et les effets de sa dégradation sur ce rôle

II.B.a) Identification du nombre de transitions et d'arcs

Pour construire cette partie de réseau, il faut tout d'abord chercher **tous les processus d'action** qui ont pour cibles les vannes situées sur les flux d'information connectés à la boîte représentant l'objet étudié. Posons N_{PA} le nombre de processus d'action trouvés.

Si l'objet étudié est représenté par une boîte fonctionnalisée d'un processus de stockage :

$$N_t = N_{PA}$$

Si l'objet étudié est représenté par une boîte fonctionnalisée d'un processus de création :

$$N_t = N_{PA} + 1$$

Car il faut ajouter une transition de plus pour modéliser un objet qui joue le rôle de source de danger. Cette transition est tirée quand la source de danger s'active et génère un message (p. ex. : au moment où la fumée commence à envahir le couloir).

$$N_a = 2.N_t$$

C'est-à-dire que dans tous les cas, il faut une transition pour chaque processus d'action préalablement identifié, et qu'il faut deux arcs par transitions. En outre, si l'objet est capable de créer un message sans avoir été préalablement averti, alors il faut une transition de plus.

Exemple : communication de l'occupant

Dans la Figure 87, rappelant la vue information, les deux vannes permettent de contrôler le flux d'information entrant et sortant de la boîte « occupant » : la vanne V7 et la vanne V8. Ces deux vannes sont les cibles des quatre processus d'action suivants : PA n°7, n°8, n°9 et n°10. Dans cet exemple, N_{PA} vaut donc 4. Par ailleurs, comme il n'y a pas de processus de création dans la boîte « occupant », N_t , le nombre de transitions vaut également 4. Le nombre total d'arcs à créer vaut donc $2.N_t$, c'est-à-dire 8.

II.B.b) Chercher si le transfert de message peut être inhibé lors d'un scénario

Ensuite, pour cette partie, il faut suivre la même procédure que dans la partie précédente, c'est-à-dire qu'il faut chercher si, parmi les processus d'action identifiés, certains modifient la capacité de l'objet à recevoir et/ou à émettre un message. Si c'est le cas, la représentation des

communications de l'objet avec les autres objets, implique **à la fois l'utilisation des places représentant l'état d'alerte de l'objet**, construites au paragraphe I.B et **l'utilisation des deux places représentant la dégradation de l'objet**, construite au paragraphe I.E. Dans ce cas, il faut donc construire deux parties de RDPE en même temps, ou réutiliser la partie dégradation si elle a déjà été construite lors de la partie déplacement de l'objet.

II.B.c) Ajouter les transitions et les arcs

Enfin, après avoir ajouté les N_t ou $N_t + 1$ transitions, il faut les relier aux places. Pour les N_t transitions, la technique est très similaire à ce qui a été fait dans la partie précédente puisqu'il faut également distinguer, parmi les N_{PA} processus d'action ceux qui sont inhibiteurs de ceux qui ne le sont pas.

Les premiers sont ceux qui engendrent un blocage des vannes et qui représentent des événements qui empêchent la réception ou l'émission d'un message (p. ex. : la surdité, le sommeil). En conséquence, les transitions représentant ces processus d'action sont ajoutées à la partie représentant la dégradation de l'objet. Le sens des arcs les reliant aux places va dans le sens de la dégradation.

Les seconds sont ceux qui engendrent simplement un mouvement des vannes et qui représentent un transfert de message. Les transitions représentant ces processus d'action sont ajoutés à la partie représentant le rôle de l'objet dans la propagation de l'alerte. Ces transitions sont en général inhibées par les précédentes. Par ailleurs, le sens des arcs les reliant aux places va dans le sens de l'alerte. Toutes les transitions modélisant un transfert de message ont la place « alerté » comme place de sortie, même si cette dernière est également la place d'entrée de la transition. Cette particularité s'explique car, un message, lorsqu'il est reçu, n'est jamais perdu (phénomène de mémoire). L'exemple fourni ci-dessous apporte de plus amples détails.

Pour ce qui est de la transition représentant le processus de création, elle n'est jamais inhibée et elle est toujours ajoutée à la partie représentant le rôle de l'objet dans la propagation de l'alerte. Les arcs qui la lient aux places vont toujours de place « message non créé » vers la place « message créé ».

Exemple : communication de l'occupant

Le réseau généré correspond à figure suivante, avec un marquage indiquant que l'occupant est vivant et qu'il ignore la présence du feu dans l'établissement :

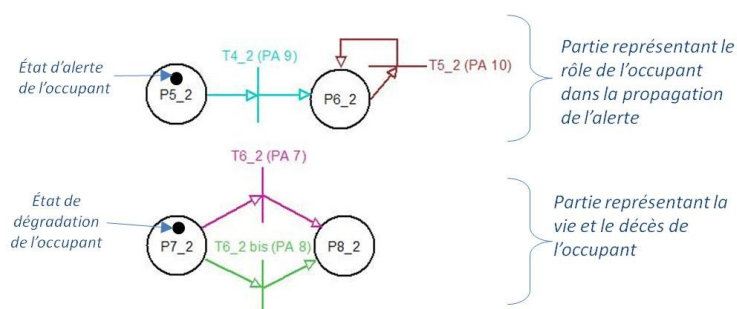


FIGURE 94 : IDENTIFICATION DES TRANSITIONS ET DES ARCS – COMMUNICATION DE L'OCCUPANT

La transition $T_{4,2}$ (en turquoise) correspond au processus d'action n°9 : l'occupant entend l'alarme. Suite au tir de cette transition, l'occupant prend conscience du danger ($P_{6,2}$ est marquée). La transition $T_{5,2}$ (en marron) correspond au processus d'action n°10 : alerte des secours. Cette transition boucle sur la place alertée car, tant que l'occupant a conscience du

danger, il peut répéter l'alerte. Ces transitions sont toutes internes car la distinction entre les trois types de transition sera effectuée ultérieurement, au paragraphe III.

Les transitions $T_{6,2}$ (en rose) et $T_{6,2bis}$ (en vert) correspondent respectivement aux processus d'action n°7 et 8 : décès de l'occupant. Si elles sont tirées, ces transitions inhibent les transitions $T_{4,2}$ et $T_{5,2}$. De plus, les arcs vont :

- dans le sens de l'alerte ($T_{4,2}$ et $T_{5,2}$), avec des arcs bouclant ($T_{5,2}$) ;
- dans le sens du décès pour les transitions $T_{6,2}$ et $T_{6,2bis}$.

II.C Partie(s) représentant les actions de l'objet sur les autres objets

Chaque processus d'action dont l'acteur est l'objet étudié (p. ex. : un occupant) mais non la cible (c'est-à-dire que les vannes qui subissent le processus d'action représentent un autre objet, par exemple une porte) est une action de l'objet étudié sur un autre objet. Si cette action est différente d'un transfert de message, qui lui est déjà pris en compte dans la partie précédente, alors il faut construire des transitions dans cette partie de réseau. Il faut une transition par processus d'action.

Par ailleurs, l'utilisation des deux places représentant la dégradation de l'objet n'est pas nécessaire ici. Ceci s'explique par la manière dont est construit le langage. En effet, un processus d'action inhibiteur bloque des vannes, rendant impossible toute action ultérieure sur ces vannes, mais ne bloque pas l'acteur du processus. Ce point pose des difficultés si, comme c'est le cas ici, l'acteur et la cible sont deux objets différents. Par exemple, la ruine de la porte bloque les vannes V1 et V2, empêchant les ouvertures et fermetures ultérieures de cette porte. En revanche, le décès de l'occupant ne bloque pas ces vannes puisque ce n'est pas parce que l'occupant est décédé que ces portes ne peuvent plus être manipulées. Pourtant, il faut interdire à l'occupant décédé d'ouvrir ces portes. Ce point sera corrigé par l'ajout d'une condition de blocage dans les conditions de sensibilisation, abordé au paragraphe VII.F.

II.C.a) Si l'action est répétable

Dans ce cas, il n'y a qu'une seule place ; place qui devient alors à la fois la place d'entrée et la place de sortie de la transition ajoutée. La partie de réseau concernée ressemble alors à la figure suivante, représentant l'action du ferme-porte sur la porte (cf. PA n°2).

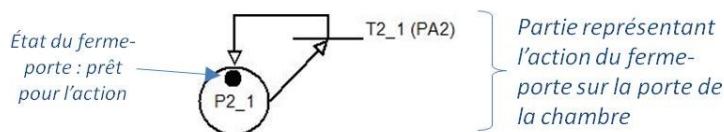


FIGURE 95 : IDENTIFICATION DES TRANSITIONS ET DES ARCS – FERMETURE DE LA PORTE PAR LE FERME-PORTE

II.C.b) Si l'action n'est pas répétable

Dans ce cas, il a deux places et une transition. La place « l'objet n'a pas encore réalisé l'action » est la place d'entrée de la transition, et la place « l'objet a réalisé l'action » sa place de sortie. La partie de réseau concernée ressemble alors à la figure suivante, représentant l'action de l'occupant sur la porte (cf. PA n°1).

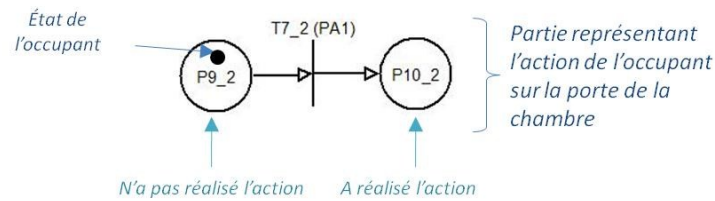


FIGURE 96 : IDENTIFICATION DES TRANSITIONS ET DES ARCS – OUVERTURE DE LA PORTE PAR L'OCCUPANT

II.D Parties représentant les interactions continues de l'objet avec le modèle aéraulique et les effets de la dégradation de l'objet sur ces interactions

La construction des transitions de cette partie est un peu différente des parties précédentes et ce pour deux raisons.

Tout d'abord parce que le nombre de positions que peuvent prendre les vannes étudiés peut être supérieur à deux. Pour illustrer ce propos, prenons l'exemple d'une porte pouvant être ouverte, demi-ouverte ou fermée. Cet exemple n'a pas été détaillé précédemment. Si l'événement « fermeture de porte » survient, il faut que le jeton puisse être ramené dans la place « fermée », que ce jeton ait été dans la place « demi-ouverte » ou « ouverte » avant cet événement. Par conséquent, il faut deux transitions pour cet unique événement : l'une ramenant le jeton de la place « ouverte » à la place « fermée » et l'autre de la place « demi-ouverte » à la place « fermée ». Ainsi, quel que soit le marquage avant l'événement, il sera correct après. Cette partie de réseau sera donc d'autant plus chargée que le nombre de positions possibles pour la (les) vanne(s) est important.

Ensuite parce qu'en cas de destruction de l'objet, il ne faut pas seulement inhiber des transitions, il faut aussi ramener le jeton dans la place permettant de faire les bons appels aux routines CIFI 2009. Si l'on reprend l'exemple de la Figure 64, on constate qu'après la destruction de la porte, le ventail a disparu et que les échanges de masse et d'énergie à travers l'ouvrant ouvert doivent donc être calculés. Pour cela, il faut ramener le jeton de la place « porte ouverte » vers la place « porte fermée » après la destruction du ventail.

Enfin, parce que l'échauffement d'un objet solide est calculé dans une transition, tirée toutes les secondes.

II.D.a) Identification du nombre de transitions et d'arcs

La construction des transitions et des arcs se fait en cinq tâches.

Premièrement, il faut reprendre le même groupe de vanne(s) que dans la partie... C'est-à-dire qu'il faut considérer uniquement les vannes représentant l'objet qui subissent les mêmes processus d'action.

Deuxièmement, il faut chercher **tous les processus d'action** qui ont pour cibles les vannes étudiées. Posons N_{PA} le nombre de processus d'action trouvés.

Troisièmement, il faut chercher le nombre de processus d'action pouvant bloquer les vannes étudiées. Posons $N_{PA,b}$ le nombre de processus d'action trouvés, avec $N_{PA,b} \leq N_{PA}$. Ces processus sont des processus inhibiteurs, qui se retrouvent dans la matrice d'interaction.

Quatrièmement, il faut chercher, pour chacun des N_{PA} processus d'action, le nombre de changements de positions de(s) vanne(s) possibles suite à l'occurrence du processus d'action. Notons $N_{dd,i}$ ce nombre de changements possibles.

Cinquièmement, il faut chercher si les vannes étudiées pilotent un flux d'énergie relié à une boîte fonctionnalisée par un processus de stockage de l'énergie représentant l'objet étudié. En d'autres termes, il faut chercher si l'objet est un objet, généralement solide, dont on souhaite calculer l'échauffement. Si c'est le cas, il faut alors compter le nombre de places construites à l'étape I.C. Notons N_p le nombre de places trouvées. Si ce n'est pas le cas, posons $N_p=0$

$$N_t = N_p + N_{PA,b} + \sum_{i=1}^{N_{PA}} N_{ddl,i}$$

$$N_a = 2.N_t$$

C'est-à-dire que :

- tout d'abord, il faut autant de transitions que de places dans le réseau si l'on est en train de construire la partie de réseau traduisant les échanges d'énergie entre l'objet solide et le gaz (ces transitions servent à calculer l'échauffement de l'objet) ;
- ensuite, pour chacun des N_{PA} processus d'action, il faut autant de transitions que de changements de positions de(s) vanne(s) possibles ;
- en outre, il faut une transition de plus que les autres pour les processus d'action inhibiteurs (soit $N_{PA,b}$ transitions de plus) ;
- enfin, il faut deux arcs par transitions.

Exemple 1 : impact de la position de la porte sur les flux de masse et d'énergie au travers de l'embrasure

Intéressons-nous aux vannes V1 et V2. Ces deux vannes subissent les processus d'action PA n°1, n°2, n°3 et n°4. N_{PA} , le nombre total de PA sur la vanne étudiée vaut donc 4.

De plus, les processus d'action PA n°3 et n°4 ont pour effet de bloquer les vannes et ainsi d'inhiber les processus d'action PA n°1 et n°2. $N_{PA,b}$, le nombre de PA inhibiteurs vaut donc 2.

$N_{ddl,i}$ le nombre de changements de positions de vannes possibles suite à l'occurrence du PA n°i vaut :

- 1 changement pour i=1 : position **fermée** vers la position **ouverte** ;
- 1 changement pour i=2 : position **ouverte** vers la position **fermée** ;
- 1 changement pour i=3 : position **fermée** vers la position **ouverte** ;
- 1 changement pour i=4 : position **fermée** vers la position **ouverte**.

Enfin, ces vannes ne pilotent pas un flux d'énergie reliant une boîte représentant l'objet au volume de gaz. Par conséquent, N_p vaut 0.

Il en découle que N_t , le nombre de transitions à créer vaut :

$$N_t = N_{PA,b} + \sum_{i=1}^{N_{PA}} N_{ddl,i} = 2 + (1 + 1 + 1 + 1) = \mathbf{6 \text{ transitions}}$$

et que N_a , le nombre d'arc à créer vaut :

$$N_a = 2.N_t = 2 \times 6 = \mathbf{12 \text{ arcs}}$$

Ces six transitions et douze arcs sont représentés plus loin sur la Figure 97.

Exemple 2 : impact de la position de la porte sur le flux énergétique absorbé par le ventail

Intéressons-nous aux vannes V3 et V4. Ces deux vannes ne subissent aucun processus d'action. Dans ce cas, $N_{PA} = N_{PA,b} = N_{ddl,i} = 0$. Toutefois, ces vannes pilotent un flux d'énergie relié à une boîte fonctionnalisée par un processus de stockage de l'énergie représentant la porte (la boîte C de la Figure 89). En raison de ce processus de stockage dans l'objet, il faut compter N_p , le nombre de places construites pour représenter les mouvements de ces vannes. Dans le cas de cet exemple, il n'y en a qu'une : la place $P_{8,3}$ de la Figure 64. Cette place indique que le ventail reçoit et absorbe un flux énergétique. Ensuite, il faut une transition : la transition $T_{9,3}$ de la Figure 64, servant à calculer l'énergie totale absorbée par le ventail depuis le début du scénario.

II.D.b) Chercher si les interactions continues en train d'être construites peuvent être perturbées par la dégradation de l'objet

Dans ce cas $N_{PA,b} \neq 0$, ce qui signifie que les mouvements des vannes étudiées peuvent être inhibés. Dans ce cas, la représentation des interactions de l'objet avec le modèle aéraulique implique **à la fois l'utilisation des places représentant l'état de l'objet vis-à-vis des échanges de masse et d'énergie**, construites au paragraphe I.C **et l'utilisation des deux places représentant la dégradation de l'objet**, construite au paragraphe I.E. Dans ce cas, il faut donc construire deux parties de RDPE en même temps, ou réutiliser la partie dégradation si elle a déjà été construite.

II.D.c) Ajouter les transitions et les arcs

Enfin, après avoir ajouté les transitions, il faut les relier aux places.

Pour les processus d'action inhibiteur, il faut construire :

- une transition dans la partie représentant la dégradation de l'objet. Les arcs reliant cette transition aux places vont dans le sens de la dégradation ;
- autant de transitions que de mouvements de vanne(s) possibles dans la partie représentant les interactions continues de l'objet avec le modèle aéraulique. Les arcs reliant ces transitions aux places vont dans le sens du mouvement des vannes (p. ex. : de l'état « demi-ouvert » vers l'état « ouvert »).

Pour les processus d'action non inhibiteurs, il faut construire autant de transitions que de mouvements de vanne(s) possibles dans la partie représentant les interactions continues de l'objet avec le modèle aéraulique. Les arcs reliant ces transitions aux places vont dans le sens des mouvements.

Pour les transitions associées au processus de stockage, il faut construire autant de transitions que de places dans la partie du réseau représentant les interactions continues de l'objet avec le modèle aéraulique. Chacune de ces places est à la fois la place d'entrée et la place de sortie de l'une des transitions.

Exemple : impact de la position de la porte sur les flux de masse et d'énergie au travers de l'embrasure

Comme détaillé précédemment, il faut fixer 6 transitions et 12 arcs pour cette partie de réseau. Le résultat est celui de la Figure 97.

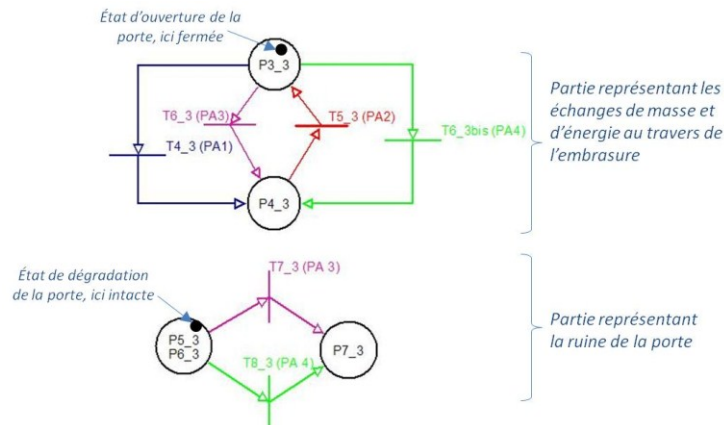


FIGURE 97 : IDENTIFICATION DES TRANSITIONS ET DES ARCS - MODÉLISATION DE L'ÉTAT D'UNE PORTE

La transition $T_{4,3}$ (en bleu) correspond à l'ouverture de la porte par l'occupant, c'est-à-dire au processus d'action n°1. Cette transition fait passer la porte de l'état fermé ($P_{3,3}$) à l'état ouvert ($P_{4,3}$). La transition $T_{5,3}$ (en rouge) correspond à la fermeture de la porte par le ferme-porte, c'est-à-dire au processus d'action n°2. Elle permet de faire passer la porte de l'état ouvert à l'état fermé puisqu'elle a $P_{4,3}$ en place d'entrée et $P_{3,3}$ en place de sortie. Puisque ces deux transitions représentent des processus d'action non inhibiteur, ils ne génèrent pas de transitions dans la partie représentant la ruine de la porte.

A l'inverse, les processus d'action n°3 et n°4 sont inhibiteurs. Ils génèrent donc chacun deux transitions : les transitions $T_{6,3}$ et $T_{7,3}$ (en rose) pour le processus d'action n°3 et les transitions $T_{6,3bis}$ et $T_{8,3}$ (en vert) pour le processus d'action n°4. Le tir des deux transitions de même couleur doit être synchronisé, synchronisation assurée par les annotations construites plus loin. De plus, les transitions $T_{6,3}$ et $T_{6,3bis}$ seront fusionnées lors de la phase de simplification des transitions (cf. paragraphe IV.A)

III. DISTINCTION ENTRE LES TRANSITIONS ACTIVES, PASSIVES ET INTERNES

Un RDPE peut contenir trois types de transitions : des transitions internes, des transitions actives et des transitions passives. Il convient de les distinguer.

Rappel :

- une transition interne est une transition qui ne concerne que l'objet étudié ;
- une transition active représente l'action de l'objet étudié sur un tiers (un autre objet) ;
- une transition passive représente l'action d'un tiers sur l'objet étudié.

Concrètement, une transition active et une transition passive destinées à fusionner représentent le même événement mais une fois du côté de l'acteur (c'est l'active) et l'autre fois du côté de la cible (c'est la passive).

Partie représentant le déplacement de l'objet et l'effet de sa dégradation sur son déplacement

Si l'acteur du processus d'action associé à la transition :

- est identique à l'objet étudié (c'est-à-dire la personne) ;
- **ou** est un volume gazeux présent dans les locaux ;

alors la transition est **interne**. C'est le cas des cinq transitions $T_{2,2}$, $T_{3,2}$, $T_{6,2}$ et $T_{7,2}$ de l'exemple de la Figure 63.

Dans le cas contraire, la transition est une transition **passive**. Ce cas n'est pas illustré mais il représenterait par exemple l'action d'un tiers qui porterait la personne étudiée hors du bâtiment en flamme (action de sauvetage).

Partie représentant le rôle de l'objet dans la propagation de l'alerte et l'effet de sa dégradation sur ce rôle

CAS 1 : la transition modélise une réception d'alerte

Si l'acteur du processus d'action associé à la transition est un volume gazeux présent dans les locaux, alors la transition est **interne**. Ce cas n'est pas illustré, mais il correspondrait par exemple à la détection du volume de gaz dans un local par un détecteur thermostatique.

Dans le cas contraire, alors la transition est une transition **passive**. C'est le cas de la transition $T_{4,2}$ de l'exemple de la Figure 63.

CAS 2 : la transition modélise une création d'alerte

Dans ce cas, la transition est une transition **interne**. Ce cas n'est pas illustré ici mais peut se retrouver dans les réseaux de l'application pratique (cf. le paragraphe III de l'Annexe 2).

CAS 3 : la transition modélise une émission d'alarme

Dans ce cas, la transition est **active**. Il s'agit de toutes les transitions dont la place amont est identique à la place aval apparaissent dans la partie représentant le rôle de l'objet dans la propagation de l'alerte. C'est le cas de la transition $T_{7,2}$ de la Figure 63.

Partie(s) représentant les actions de l'objet sur les autres objets

Dans ce cas, la transition est **active**. Il s'agit de toutes les transitions de la partie représentant les actions de l'objet sur les autres objets. C'est le cas de la transition $T_{7,2}$ de l'exemple de Figure 63, représentant l'occupant ; et de la transition $T_{2,1}$ de l'exemple de la Figure 62, représentant le ferme-porte.

Partie représentant les interactions continues de l'objet avec le modèle aéraulique et les effets de la dégradation de l'objet sur ces interactions

CAS 1 : la transition modélise l'échauffement de l'objet solide

Dans ce cas, la transition est **interne**. Il s'agit de toutes les transitions associées à un processus de stockage de l'énergie. C'est le cas de la transition $T_{9,3}$ de l'exemple de la Figure 64.

CAS 2 : la transition représente un processus d'action non inhibiteur

La transition est **interne** si l'acteur du processus d'action associé à cette transition :

- est identique à l'objet étudié ;
- **ou** est un volume gazeux présent dans les locaux.

Ce cas n'est pas illustré dans ce mémoire.

Dans le cas contraire, la transition est **passive**. C'est le cas des transitions $T_{4,3}$ et $T_{5,3}$ de l'exemple de la Figure 64.

CAS 3 : la transition représente un processus d'action inhibiteur

Ce type de processus génère :

- une transition dans la partie représentant la dégradation de l'objet (type A) ;

- plusieurs transitions dans la partie représentant les interactions continues de l'objet avec le modèle aéraulique (type B).

La transition de type A sert à modéliser l'occurrence d'un blocage de vanne tandis que les transitions de type B permettent de ramener le jeton dans la place adéquate suite à ce blocage.

Les transitions de type B sont toujours **internes**. C'est le cas de la transition $T_{6,3}$ de l'exemple de la Figure 64.

La transition de type A est **interne** si l'acteur du processus d'action est :

- identique à l'objet représenté par la vanne étudiée ;
- **ou** est un volume gazeux présent dans les locaux.

C'est le cas de la transition $T_{7,3}$ de l'exemple de la Figure 64.

Dans le cas contraire (l'acteur est une autre entité), alors cette transition de type B est **passive**. C'est le cas de la transition $T_{8,3}$ de l'exemple de la Figure 64.

IV. SIMPLIFICATIONS DE LA STRUCTURE DU RÉSEAU ÉLÉMENTAIRE

IV.A Simplifications du nombre de transitions

CAS général : valable pour toutes les parties précédemment construites

Toutes les transitions **passives** ayant rigoureusement les mêmes places d'entrée et de sortie fusionnent en **une seule transition passive**. Cette fusion est autorisée car, dans le formalisme, une même transition passive peut être utilisée par plusieurs transitions actives (cf. premier chapitre). Ce cas n'est pas illustré ici.

CAS spécifique : valable uniquement pour la partie représentant les interactions continues de l'objet avec le modèle aéraulique

Toutes les transitions **internes** qui modélisent un PA bloquant et qui ont rigoureusement les mêmes places d'entrée et les mêmes places de sortie fusionnent en **une seule transition interne**. Cette fusion est essentielle car elle évite un conflit effectif qui rendrait les simulations impossibles. De plus, ces transitions servent à ramener le jeton dans la place correspondant à l'état d'ouverture *ad hoc* suite à la dégradation de l'objet, et une seule transition est suffisante pour le faire. La fusion des transitions $T_{6,3}$ et $T_{6,3bis}$ de la Figure 97 est un exemple de simplification illustrant ce cas.

IV.B Simplification du nombre de places

S'il se révèle que l'objet est infailible, alors il n'y a aucune transition dans la partie représentant la dégradation de l'objet. Dans ce cas, les deux places construites pour représenter l'état intact et l'état dégradé sont inutiles et peuvent être supprimées. C'est le cas du ferme-porte qui ne contient pas de partie représentant sa dégradation dans la Figure 62.

V. IDENTIFICATION DE L'ÉTAT INITIAL ET AJOUT DES TRANSITIONS D'INITIALISATION

V.A Identification de l'état initial

Tout objet est caractérisé par un état initial en début de scénario. Pour définir cet état, il faut connaître, **dans chaque partie de réseau**, la place à marquer initialement. Autrement dit, l'état initial d'un objet résulte du marquage initial de chacune de partie de réseau le représentant. Par exemple, au début d'un scénario, l'occupant est à la fois vivant, présent dans la chambre et ignore la présence du feu. Il faut donc trois jetons pour représenter son état initial.

Pour chaque partie de réseau, deux cas sont possibles.

Cas n°1 : la place à marquer initialement est la même dans tous les scénarios

Dans ce cas, l'état initial (pour cette partie de réseau uniquement) est déterministe et aucune transformation du réseau ne doit être réalisée.

Cas n°2 : la place à marquer initialement diffère d'un scénario à l'autre

Dans ce cas, l'état initial (pour cette partie de réseau uniquement) est aléatoire et il est nécessaire de transformer le réseau. Cette transformation consiste à :

- ajouter une place ;
- ajouter autant de transitions que de places initiales possibles.

Ces transitions permettront, à chaque scénario, de répartir le jeton dans la place initiale appropriée. Le choix de la transition à tirer (et donc de la place appropriée) dépend de la valeur d'une variable, tirée aléatoirement (cf. partie suivante).

Exemple : l'état initial de la porte

La porte a deux états initiaux possibles : ouvert ou fermé. Dans le but de répartir le jeton dans l'état approprié au début d'un scénario, il faut ajouter la place P_{2_3} et les transitions T_{2_3} et T_{3_3} .

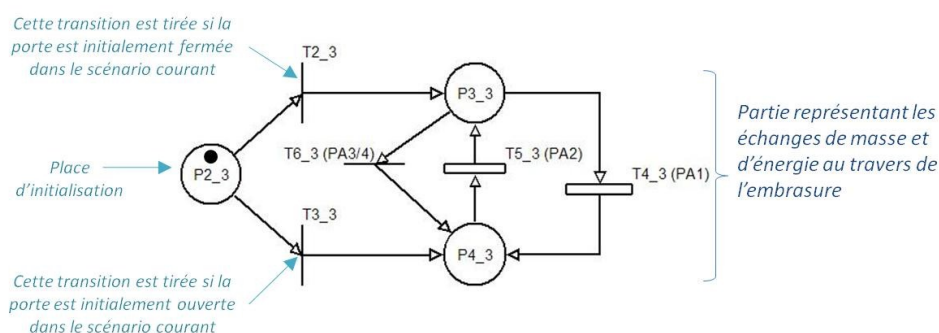


FIGURE 98 : AJOUT DE TRANSITIONS D'INITIALISATION DE L'ÉTAT INITIAL D'UN OBJET

V.B Concaténation des différentes parties

La concaténation consiste à mettre toutes les parties de réseau ensemble, à ajouter une place d'initialisation P_{1_k} et une transition T_{1_k} , ayant la place d'initialisation P_{1_k} en place d'entrée et les places initiales de chacune des parties en places de sortie. Les Figure 62, Figure 63 et Figure 64

illustrent le résultat des concaténations de parties. A ce stade de la construction, la structure et le marquage initial sont achevés.

VI. IDENTIFICATION DES VARIABLES NÉCESSAIRES

Des variables sont nécessaires pour piloter le fonctionnement des réseaux de Petri. Des règles construites pour identifier et nommer les variables nécessaires sont énoncées ci-dessous.

VI.A Variables générales liées à tout objet

À chaque objet est associée une variable **ip** traduisant le lieu (local ou environnement) dans lequel elle se trouve. Cette variable est un numéro, associé au numéro du lieu contenant. De plus, cette variable évolue si l'objet concerné se déplace, comme c'est le cas de l'occupant (cf. Figure 63).

Exemple

Dans l'exemple suivi dans ce chapitre, le numéro 1 représente la chambre, le n°2 le couloir et le n°3 l'extérieur.

VI.B Variables liées aux transitions d'initialisation de l'état initial

Si l'état initial d'un objet varie d'un scénario à l'autre, il faut ajouter une ou plusieurs variables pour qu'au début de chaque scénario, les jetons puissent être répartis dans les places correspondant au bon état initial par les transitions d'initialisation.

En général, ces variables se notent E_0 (comme état à l'instant t_0). Par ailleurs, il faut autant de variables que de partie de réseau dans laquelle l'état initial peut varier (p. ex. : pour faire varier à la fois la position initiale et l'état d'alerte initial de l'occupant, il faut deux variables). Chacune des variable E_0 peut alors prendre autant de valeurs numériques que de places initiales possibles dans la partie de réseau à laquelle la variable est associée (p. ex. : si un occupant a trois positions initiales possibles, il faut trois valeurs : 1, 2 et 3).

Exemple : l'état initial de la porte

La variable E_0 de la Figure 64 sert à traduire l'état d'ouverture initial de la porte. Dans ce cas, deux états initiaux sont possibles : la porte est initialement ouverte (dans ce cas, E_0 vaut 2) et la porte est initialement fermée (dans ce cas, E_0 vaut 1).

VI.C Variables liées au calcul des échanges de masse et d'énergie entre un objet et les zones gazeuses

Ce calcul est réalisé dans les fonctions continues, construites au paragraphe IX. Ces fonctions continues sont les routines CIFI 2009 appelées dans les places.

Soit une fonction continue f qui associe des variables de sortie y_i (p.ex. : un débit d'énergie) à des variables d'entrées x_i (p.ex. : un gradient de température, une surface d'échange etc.). Pour pouvoir construire correctement les appels à ces fonctions, **les variables d'entrées (x_i)** doivent être connues et déclarées dans l'objet.

Exemple : calcul des flux de masse et d'énergie au travers de la porte

Pour calculer les flux de masse et d'énergie au travers de la porte, la routine V de CIFI 2009 est utilisée dans la Figure 64. Cette routine nécessite des variables d'entrée fournissant à la fois les caractéristiques du gaz de part et d'autre de la porte (p. ex. : la température des zones hautes $T_{zh}^{ip_1}$ et $T_{zh}^{ip_2}$) et des caractéristiques de la porte (p. ex. : ses dimensions H et W). Toutes des variables d'entrée de la routine V doivent être déclarées dans le réseau, c'est-à-dire les variables suivantes :

$$X_3: \left\{ \underbrace{T_{zh}; T_{zb}; \Delta P; Y_{O_{2,zh}}; Y_{O_{2,zb}}; Y_{f,zh}; Y_{f,zb}; Z}_{\text{Caractéristiques des zones gazeuses}}; \underbrace{H; W; ip_1; ip_2}_{\text{Caractéristiques de la porte}} \right\}.$$

VI.D Variables liées au calcul de l'absorption et de la diffusion d'énergie dans un objet solide

Certaines transitions servent à calculer l'énergie stockée dans l'objet et la diffusion de cette énergie dans l'objet (p. ex. : par la résolution de l'équation de la chaleur dans le solide).

Ce calcul se fait par l'appel à une routine CIFI 2009 lors du tir, toutes les secondes, de ces transitions. D'une part, pour que cet appel se fasse correctement, **les y_i variables de sortie et les x_i variables d'entrées** de la routine doivent être connues et déclarées dans l'objet. D'autre part, pour que le tir se fasse bien toutes les secondes, une variable, notée t_{maj} (comme instant de mise-à-jour) est nécessaire. Cette variable est itérée d'une seconde à chaque tir de transition.

Exemple : calcul de l'échauffement de la porte

La transition $T_{9,3}$ de la Figure 64 sert à calculer la quantité totale d'énergie absorbée par le ventail depuis le début du scénario. La diffusion de la chaleur dans cette porte n'est pas traitée. Le calcul de cette énergie absorbée est réalisé par la routine R de CIFI 2009, routine qui nécessite des variables d'entrée fournissant à la fois les **caractéristiques du gaz** de part et d'autre de la porte et des **caractéristiques de la porte**. Par ailleurs, la routine R stocke le résultat du calcul dans une variable de sortie, en l'occurrence **la variable e_p , l'énergie accumulée dans la porte**. Toutes ces variables d'entrée et de sortie doivent être déclarées dans le réseau, c'est-à-dire les variables suivantes :

$$X_3: \left\{ \underbrace{\overbrace{T_{zh}; T_{zb}; Z}^{\text{Caractéristiques des zones gazeuses}}; \underbrace{H; ip_1; ip_2}_{\text{Caractéristiques de la porte}}}_{\text{Variables d'entrée}}; \underbrace{e_p}_{\text{Variables de sortie}} \right\}$$

VI.E Variables liées aux signaux de danger

Si un objet est capable de créer un message (c'est-à-dire s'il est représenté par une boîte avec un processus de création d'information), alors une transition représente l'occurrence de la création du message. Il faut autant de variables que nécessaire pour traduire les conditions d'occurrence du message.

Exemple : fumée envahissant un local

Admettons qu'un message d'alerte soit créé dès que la fumée envahisse un local i. Dans ce cas, il faut déclarer dans l'objet une ou plusieurs variables permettant d'écrire « il y a de la fumée dans le local ». En l'occurrence, pour cet exemple, ces variables sont :

- Z_i : les hauteurs d'interface thermique dans le local i ;
- H : la hauteur de plafond.

En effet, ces variables permettent d'écrire la condition suivante. Si $Z_i < H$, alors une couche chaude existe et il y a de la fumée dans le local i .

VI.F Variables liées aux processus d'action

Un certain nombre de variables est associé d'office à chaque processus d'action. Ensuite, selon le cas, des variables additionnelles peuvent être requises.

Variables introduites par défaut

Les variables associées par défaut à chaque processus d'action $n^o x$ (noté PAx) sont les suivantes :

- R_x , une variable booléenne vraie (R_x) ou fausse ($\overline{R_x}$) servant mémoriser si le PAx a eu lieu ou non dans le scénario courant (au début du scénario, cette variable est fausse et vaut donc $\overline{R_x}$) ;
- t_x , un entier positif servant à stocker l'instant auquel le PAx a eu lieu dans le scénario courant (au début du scénario, cette valeur vaut ∞) ;
- Δt_x , un entier positif correspondant au délai de synchronisation entre l'événement initiateur du PAx et le PAx ;
- P_x , un réel tel que $0 \leq P_x \leq 1$ correspondant à la probabilité conditionnelle de réalisation du PAx , sachant que l'événement initiateur s'est réalisé (pour tous les scénarios) ;
- Po_x , une variable booléenne vraie (Po_x) ou fausse ($\overline{Po_x}$) traduisant la possibilité, pour un scénario donné, de voir la réalisation du PAx . Cette variable, directement liée à P_x , est tirée aléatoirement à chaque scénario.

Les trois dernières variables servent à écrire les conditions à respecter pour voir survenir le PAx . Les deux premières, R_x et t_x permettent de savoir si le PAx a eu lieu, et si oui quand. Ces deux variables sont utilisées pour assurer les enchaînements correctement temporisés de PA .

Exemple :

Considérons le processus d'action $n^o 5$: l'occupant sort de la chambre. Pour ce processus d'action, il faut fixer les variables suivantes :

- Δt_5 : le temps que l'occupant met pour sortir de la chambre après avoir entendu l'alarme. Conformément au délai du $PA n^o 5$, ce temps est fixé entre [15 ; 180] secondes ;
- P_5 : la probabilité que l'occupant sorte après avoir entendu l'alarme. Conformément au délai du $PA n^o 5$, cette variable vaut 1 (il sort toujours) ;
- Po_5 : la possibilité, pour le scénario courant, que l'occupant sorte après avoir entendu l'alarme. Puisque P_5 vaut 1, cette variable est vraie dans tous les scénarios ;
- R_5 : la variable booléenne indiquant si l'occupant est ou non sorti de sa chambre dans le scénario courant ;
- t_5 : cette variable stocke l'instant auquel l'occupant sort de la chambre.

Remarque :

La lecture des Figure 62, Figure 63 et Figure 64, permet de constater qu'il n'y a pas autant de variables pour chaque processus d'action dans les réseaux finaux. Cette différence s'explique par le fait que les variables inutiles ont été écartées. Le nombre total de variable au terme de la construction est donc moins élevé. Les règles de simplification sont détaillées au paragraphe XI.

Variables additionnelles nécessaires si l'événement initiateur est lié aux conditions physiques

Cet événement initiateur s'exprime en général en comparant les conditions physiques exprimées par des variables d'état (p. ex. : la température de la zone gazeuse haute) avec des valeurs seuils, spécifiques à l'objet (p. ex. : la température de la zone gazeuse haute maximale supportée par l'objet).

Il faut alors fixer autant de variables d'état et de seuils nécessaires pour écrire la condition d'occurrence de l'événement initiateur.

Exemple : la ruine de la porte

La porte est ruinée si la chaleur accumulée dans la porte (notée e_p) dépasse un certain seuil, dit seuil de ruine (noté $e_{p,s}$). Dans cet exemple il y a une variable d'état (e_p) pour une variable de seuil ($e_{p,s}$), soit un total de deux variables nécessaires.

Variables additionnelles nécessaires si la dégradation de l'objet inhibe des processus d'action

Si l'objet peut être dégradé, alors certaines vannes peuvent être bloquées et certains processus d'action inhibés. Pour traduire cette inhibition, des variables de blocages, notées blo_i sont nécessaires.

Posons :

- N_{dlib} , le nombre de positions dans lesquelles la (les) vanne(s) peut (peuvent) être bloquée(s) (p. ex. : bloquée ouverte, bloquée fermée, bloquée mi-ouverte, etc.) ;
- N_{blo} , le nombre de variables nécessaires pour traduire le blocage de la (des)vanne(s).

$$N_{blo} = N_{dlib},$$

C'est-à-dire qu'il faut une **variable par position bloquée possible**.

Pour une position de blocage i , il existe une variable booléenne blo_i vraie (blo_i) ou fausse ($\overline{blo_i}$) : l'occurrence d'un blocage des vannes dans la position i .

Exemple : ruine de la porte

Les vannes V1 et V2 peuvent être bloquées dans une position ouverte en cas de ruine de la porte. Étant donné qu'une seule position de blocage est possible (bloqué ouvert), une seule variable de variable blo_1 est nécessaire.

VII. CONSTRUCTION DES CONDITIONS DE SENSIBILISATION

Une condition de sensibilisation est associée à chaque transition afin d'en déterminer la possibilité de tir. Elle s'exprime sous forme de condition(s) booléenne(s), à l'aide des variables établies ci-avant. L'évaluation de telle(s) condition(s) est réalisée toutes les secondes, tant que la transition est sensibilisée (donc que les places d'entrée sont suffisamment marquées). Si les conditions sont respectées, la transition est tirée. Dans le cas contraire, la transition n'est pas tirée.

Remarque :

Ne pas confondre condition booléenne et variable booléenne. Une condition booléenne consiste à poser une contrainte sur la valeur d'une variable (booléenne ou non).

Par exemple :

- soit une variable booléenne ayant deux valeurs possibles : $(blo; \overline{blo})$;
- soit une condition booléenne : blo , respectée si la valeur de la variable vaut blo et non respectée si la valeur de la variable vaut $\overline{blo}$;
- soit une condition booléenne : $\overline{blo}$, respectée si la valeur de la variable vaut $\overline{blo}$ et non respectée si la valeur de la variable vaut blo .

VII.A Transitions d'initialisations

Transition servant à initialiser les variables aléatoires

Il n'y a jamais de condition de sensibilisation associées à la transition servant à initialiser les variables aléatoires. (cf. la transition $T_{1,1}$ de la Figure 62).

Transition servant à initialiser l'état de l'objet

En revanche, il faut des conditions de sensibilisation pour les transitions servant à initialiser l'état initial de l'objet. Ces conditions de sensibilisation s'écrivent sous la forme : $E_0=j$; avec j le numéro correspondant à l'état initial de l'objet pour le scénario courant.

Exemple : l'état initial de la porte

La porte a deux états initiaux sont possibles : initialement fermée (dans ce cas $T_{2,3}$ doit être tirée) et initialement ouverte (dans ce cas $T_{3,3}$ doit être tirée).

La condition de sensibilisation de la transition $T_{2,3}$, ayant la place « fermée » (c'est-à-dire $P_{3,3}$) comme place de sortie s'écrit comme suit :

$$e_{2,3}: E_0 = 1$$

Ce qui signifie que si E_0 vaut 1, alors $T_{2,3}$ est sensibilisée et tirée.

A l'inverse, la condition de sensibilisation de la transition $T_{3,3}$ ayant la place « ouverte » (c'est-à-dire $P_{4,3}$) comme place de sortie s'écrit comme suit :

$$e_{3,3}: E_0 = 2$$

Ce qui signifie que si E_0 vaut 2, alors c'est $T_{3,3}$ qui est sensibilisée et tirée.

VII.B Transitions servant à calculer l'absorption et la diffusion d'énergie dans l'objet solide

Les conditions de sensibilisation de ces transitions s'écrivent toujours comme suit :

$$e: t \geq t_{maj} + 1$$

VII.C Transitions représentant une création d'information

Les conditions de sensibilisation de ces transitions correspondent à la traduction booléenne des conditions de création du message.

Exemple : présence de fumée dans un local i

Si l'on reprend l'exemple du local i enfumé de la section VI.E, la condition de sensibilisation s'écrirait comme suit :

$$e: Z^i < H$$

Cette condition signifie que si la hauteur d'interface thermique est plus basse que H la hauteur de plafond, une couche chaude de fumée s'est établie dans le local i et qu'il y a de la fumée dans ce local.

VII.D Transitions représentant un processus d'action inhibé

Les conditions de sensibilisation de ces transitions doivent être fixées de telles manières que ces transitions soient inhibées si l'objet subit une dégradation.

Cas des transitions passives

Par définition, toutes les transitions passives ont une condition de sensibilisation de la forme d'une suite de conditions booléennes : $\prod_{i=1}^{N_{ddlb}} (\overline{blo_i})$. Cette condition est vraie si toutes les variables traduisant l'occurrence d'un blocage sont fausses (aucun blocage n'a eu lieu).

Exemple : la fermeture de la porte

La transition passive $T_{5,3}$ de la Figure 64 représente la possibilité de fermer la porte. Cette transition représente le processus d'action n°2, qui est inhibé si l'un des processus d'action n°3 ou n°4 (ruine de la porte) survient. Il en découle que la condition de sensibilisation de $T_{5,3}$ est la suivante :

$$e_{5,3} : \overline{blo_1}$$

Ce qui signifie que la porte ne peut être fermée à condition qu'elle ne soit pas détruite.

Cas des transitions internes et actives

Les conditions de sensibilisation de ces transitions correspondent à la **traduction booléenne des conditions initiatrices du PA**, à laquelle la suite de conditions booléennes $\prod_{i=1}^{N_{ddlb}} (\overline{blo_i})$ est ajoutée.

Exemple : le déplacement de l'occupant

Les transitions internes $T_{2,2}$ et $T_{3,2}$ de la Figure 63 représentent le déplacement de l'occupant d'un local à un autre. La transition $T_{2,2}$ correspond au PA n°5 et la transition $T_{3,2}$ au PA n°6. Par ailleurs, ces deux PA s'enchaînent. En effet, le PA n°5 est le processus d'action initiateur du PA n°6, ce qui signifie que c'est parce que l'occupant est sortie de la chambre qu'il peut sortir du couloir.

A ce stade de la construction, la condition de sensibilisation de $T_{3,2}$ s'écrit comme suit :

$$e_{3,2} : \underbrace{R_5}_{\substack{\text{l'événement initiateur} \\ \text{a-t-il eut lieu ?} \\ \text{(ici, la sortie de la} \\ \text{chambre c.à.d le PA n°5)}}} \wedge \underbrace{Po_6}_{\substack{\text{la probabilité} \\ \text{d'occurrence} \\ \text{est-elle respectée ?}}} \wedge \underbrace{[t > (t_5 + \Delta t_6)]}_{\substack{\text{le délai depuis} \\ \text{l'événement initiateur} \\ \text{(la sortie de la chambre)} \\ \text{est-il écoulé ?}}} \wedge \underbrace{\overline{blo_1}}_{\substack{\text{l'occupant peut-il} \\ \text{se déplacer ?} \\ \text{(est-il vivant ?)}}$$

Dans la Figure 63, cette condition de sensibilisation est moins compliquée. La différence entre les deux sera éliminée lors de la phase de simplification des annotations, détaillée au paragraphe XI.B.

VII.E Transitions représentant un processus d'action inhibiteur

Dans la partie représentant la dégradation de l'objet

La condition de sensibilisation de cette transition est la **traduction booléenne des conditions initiatrices du PA**.

De plus, si le processus est également inhibé par un autre processus d'action, il faut alors ajouter la suite de conditions booléennes $\prod_{i=1}^{N_{ddlb}} (\overline{blo_i})$.

Dans la partie représentant les interactions continues interactions continues de l'objet avec le modèle physique

Dans cette partie, un processus inhibiteur donne naissance à plusieurs transitions permettant de ramener le jeton dans la place adéquate suite à ce blocage. Les conditions de sensibilisation sont (blo_i). Cette condition est validée si la vanne est bloquée dans la position i.

Exemple : effet de la ruine de la porte sur les flux de masse et d'énergie au travers de l'embrasure

Le processus d'action n°3 représente la ruine thermique de la porte. Par ailleurs, il s'agit d'un processus d'action inhibiteur. Ce processus d'action a donné naissance à deux transitions dans la Figure 64 : $T_{6,3}$ et $T_{7,3}$. La transition $T_{6,3}$ sert à ramener le jeton de la place $P_{3,3}$ à la place $P_{4,3}$ si la ruine survient. La condition de sensibilisation de cette transition s'écrit donc :

$$e_{6,3}: blo_1$$

Ce qui signifie que si la porte fermée se ruine (et donc que blo_1 est vrai), le ventail disparaît et des flux de masse et d'énergie traversent l'embrasure. En effet, $T_{6,3}$ est tirée ce qui entraîne le marquage de $P_{3,3}$.

VII.F Autres transitions

Pour toutes les autres transitions, il faut se demander si l'occurrence de la dégradation (si elle existe) empêche le tir de ces transitions.

Dans le cas positif, les conditions de sensibilisation de ces transitions correspondent à la **traduction booléenne des conditions initiatrices du processus d'action**, à laquelle la suite de conditions booléennes $\prod_{i=1}^{N_{dlib}} (\overline{blo_i})$ est ajoutée.

Dans les cas négatif, les conditions de sensibilisation de ces transitions correspondent à la **traduction booléenne des conditions initiatrices du processus d'action**.

Exemple : effet du décès de l'occupant sur sa capacité à ouvrir la porte de la chambre

Reprenons l'exemple de l'occupant. Dans le réseau de la Figure 63, la transition $T_{7,2}$ représente l'occupant qui ouvre la porte du studio, ce qui correspond au processus d'action n°1. Or, ce processus d'action n°1 n'a aucun lien d'inhibition (c'est-à-dire qu'il n'est ni inhibé, ni inhibiteur) avec les autres processus d'action du réseau, c'est-à-dire avec les processus d'action n°5, n°6, n°7, n°8, n°9 et n°10. Dans ce cas, il est nécessaire de se demander si le décès de l'occupant (c.à.d. la transition $T_{6,2}$ associée aux processus d'action n°7 et n°8) peut l'empêcher d'ouvrir la porte. En tout état de cause, la réponse à cette question est positive. Dans ce cas, La condition de sensibilisation de la transition $T_{7,2}$ s'écrit :

$$e_{7,2}: \underbrace{R_5}_{\substack{\text{l'événement initiateur} \\ \text{a-t-il eut lieu ?} \\ \text{(ici, la sortie de la} \\ \text{chambre c.à.d le PA n°5)}}} \wedge \underbrace{Po_1}_{\substack{\text{la probabilité} \\ \text{d'occurrence} \\ \text{est-elle respectée ?}}} \wedge \underbrace{[t > (t_5 + \Delta t_1)]}_{\substack{\text{le délai depuis} \\ \text{l'événement initiateur} \\ \text{(la sortie de la chambre)} \\ \text{est-il écoulé ?}}} \wedge \underbrace{\overline{blo_1}}_{\substack{\text{l'occupant peut-il} \\ \text{ouvrir la porte ?} \\ \text{(est-il vivant ?)}}$$

VIII. CONSTRUCTION DES FONCTIONS DE JONCTION

Une fonction de jonction est associée à chaque transition. Cette fonction permet de faire évoluer les variables de manière discrète.

VIII.A Transitions d'initialisations

Transition servant à initialiser les variables aléatoires

C'est la fonction de jonction associée à cette transition qui permet le tir de ces variables. Pour y parvenir, il faut utiliser l'une des fonctions⁶³ suivantes :

- $U(x_1; x_2)$ qui renvoie un nombre entier dans l'intervalle $[x_1; x_2]$, avec une loi de distribution uniforme (c'est-à-dire que toutes les valeurs sont équiprobables);
- $V(x_1; x_2)$ renvoie un nombre décimal dans l'intervalle $[x_1; x_2]$, avec une loi de distribution uniforme.

Les valeurs de x_1 et de x_2 sont en général indiquées dans le modèle systémique (soit par les intervalles fixés dans les processus d'action, soit par des informations textuelles ajoutées).

Exemple : tir des variables aléatoires du réseau « occupant »

Considérons à nouveau l'exemple de l'occupant. La transition $T_{1,1}$ du réseau de la Figure 62, sert à tirer les variables aléatoires. Dans cet exemple, deux variables sont concernées :

- P_{o10} : la possibilité pour un scénario donné de voir l'événement du processus d'action n°10 se réaliser ;
- Δt_5 : le délai de synchronisation entre l'événement initiateur du processus d'action n°5 et l'occurrence du processus d'action n°5.

Ces deux variables n'étant pas de même nature, la manière de leur attribuer une valeur pour un scénario diffère. D'une part, P_{o10} est une variable booléenne. Pour lui donner une valeur, un nombre aléatoire tiré entre 1 et 100 est comparé à P_{10} , la fréquence d'occurrence du processus n°10 exprimée en pourcent. Si, pour un scénario, la valeur tirée aléatoirement est inférieure ou égale à P_{10} , alors P_{o10} prend la valeur « vraie ». Dans le cas contraire, P_{o10} prend la valeur « fausse ». D'autre part, Δt_5 est un délai. Sa valeur est tirée au début de chaque histoire entre les deux valeurs extrêmes définies dans le processus d'action n°5. En définitive, la fonction de jonction de cet exemple s'écrit comme suit :

$$j_{1,2}: P_{o10} = U(1; 100) \leq (P_{10} \times 100); \Delta t_5 = U(15; 180)$$

Transition servant à initialiser l'état initial de l'objet

Il n'y a jamais de fonction de jonction pour les transitions servant à initialiser l'état initial de l'objet.

VIII.B Transitions servant à calculer l'absorption et la diffusion d'énergie dans l'objet solide

La fonction de jonction de ces transitions permet le calcul de l'énergie accumulée. Il faut donc appeler, dans cette fonction de jonction, la routine CIFI 2009 adéquate.

Exemple : calcul de l'énergie accumulée dans la porte

Le réseau de la Figure 64 représente la porte. Dans ce réseau, lorsque le jeton marque $P_{8,3}$, la porte est soumise à une sollicitation thermique de la part du gaz avoisinant. Le

⁶³ Ces fonctions sont disponibles dans la bibliothèque de l'outil de calcul numérique Scilab

calcul de « e_p », l'énergie accumulée dans la porte sous l'effet de cette sollicitation est réalisé lors du tir de la transition T_{9_3} , plus précisément lors de l'appel de la routine R de CIFI 2009 dans la fonction de jonction j_{9_3} . Cette fonction s'écrit comme suit :

$$j_{9_3}: \underbrace{e_p = R(T_{zh}; T_{zb}; Z_d; H)}_{\substack{\text{Appel à la routine R de CIFI 2009} \\ \text{Calcul de } e_p}} ; \quad \underbrace{t_{maj} = t}_{\substack{\text{Mise à jour de la variable } t_{maj} \\ \text{permettant le tir périodique de } T_{9_3}}}$$

VIII.C Transitions représentant un processus d'action inhibiteur

Dans la partie représentant la dégradation de l'objet

La fonction de jonction d'une transition représentant le PAx sert à fixer :

- la valeur booléenne de R_x à « vrai » ;
- fixer la valeur de t_x à l'instant courant ;
- fixer la valeur booléenne de blo_i à « vrai ».

Ces fonctions s'écrivent alors de la manière suivante :

$$j: R_x; t_x = t; blo_i$$

Dans la partie représentant les interactions continues de l'objet avec le modèle physique

Dans cette partie, un processus inhibiteur donne naissance à plusieurs transitions permettant de ramener le jeton dans la place adéquate suite à ce blocage. Ces transitions n'ont pas de fonction de jonction.

Exemple : ruine de la porte

Dans le réseau de la Figure 64, les transitions T_{6_3} , T_{7_3} et T_{8_3} représentent la ruine de la porte, soit par les secours, soit sous l'action de la sollicitation thermique. Considérons la ruine de la porte par sollicitation thermique, c'est-à-dire les transitions T_{6_3} et T_{7_3} . La première figure dans la partie représentant les interactions continues de l'objet avec le modèle physique. En conséquent, elle n'a pas de fonction de jonction. A l'inverse, la seconde figure dans la partie représentant la dégradation de l'objet. Sa fonction de jonction sert à indiquer que le processus d'action, ici le n°3 a eu lieu et surtout que le blocage de certaines vannes est effectif. Concrètement, la fonction de jonction s'écrit comme suit :

$$j_{7_3}: \underbrace{R_3; t_3 = t}_{\substack{\text{le processus d'action n°3} \\ \text{a lieu à l'instant } t}} ; \quad \underbrace{blo_1}_{\substack{\text{la porte est détruite} \\ \text{les vannes sont bloquées ouvertes}}}$$

VIII.D Autres transitions

Toutes les fonctions de jonction des autres transitions s'écrivent comme suit :

$$j: R_x; t_x = t$$

De plus, si la transition représente le déplacement de l'objet, alors la variable ip doit être mise à jour et prendre pour valeur le numéro du lieu dans lequel l'objet entre.

Exemple : l'occupant sort de la chambre

Le réseau de la Figure 63 représente l'occupant. Dans ce réseau, la transition T_{2_2} , associée au processus d'action n°5 traduit la sortie de l'occupant de la chambre.

IX. CONSTRUCTION DES FONCTIONS CONTINUES

Ces fonctions sont utiles uniquement dans la partie du réseau représentant les interactions continues de l'objet avec le modèle physique, c'est-à-dire la partie à dynamique hybride.

Les fonctions de calcul correspondent aux interactions continues qu'entretennent les objets avec le modèle aéraulique. Elles permettent de calculer les flux nets (de masse et d'énergie) échangés entre le gaz et l'objet (p. ex. : le foyer, une porte, une trappe de désenfumage). Ces flux sont calculés par des routines CIFI 2009.

Le tableau suivant propose les noms de quelques routines CIFI 2009 et détaillent ce qu'elles calculent.

Objet	Nom de la routine CIFI 2009	Processus représentés	Phénomènes prédits
Foyer	F	création de masse, création d'énergie, transfert de masse et d'énergie avec le volume de gaz	Pyrolyse d'un objet solide, combustion, entraînement d'air dans la flamme et le panache, rayonnement de la flamme, élévation du panache sous l'effet de la flottabilité
Porte	O	transfert de masse et d'énergie entre deux volumes de gaz	Écoulements à travers une ouverture verticale, entraînement d'air dans un panache d'ouverture
Parois	P	transfert d'énergie entre un gaz et une paroi	transferts thermiques entre un gaz et une paroi (modèle de convection et de rayonnement)

TABLEAU 30 : EXEMPLE DE FONCTIONS CONTINUES

Les fonctions continues sont appelées dans certaines places. Il s'agit des places pour lesquelles l'interaction existe (flux non nul). De telles places sont repérées dans le réseau par la couleur bleue.

Exemple : calcul des flux d'air au travers de l'embrasure

Dans le réseau de la porte (cf. fig.), les places $P_{3,3}$ (porte fermée), $P_{4,3}$ (porte ouverte) et $P_{8,3}$ (porte exposée à la sollicitation thermique) sont dévouées au calcul des flux nets de masse et d'énergie échangés entre la porte (l'embrasure de la porte pour $P_{3,3}$ et $P_{4,3}$; le ventail de la porte pour $P_{8,3}$) et le gaz. Dans cet exemple, les hypothèses suivantes ont été posées :

- la porte est étanche, c'est-à-dire que ni gaz ni énergie ne traversent l'embrasure lorsqu'elle est fermée ;
- l'embrasure est traversée par des flux de masse et d'énergie lorsque la porte est ouverte ;
- la sollicitation thermique du ventail ne fait pas perdre d'énergie au gaz avoisinant.

En raison de ces hypothèses, seule la place $P_{4,3}$ requiert une fonction continue $f_{4,3}$. Cette place est donc coloriée en bleu. La fonction $f_{4,3}$ appelle la routine V de CIFI 2009, routine qui calcule les échanges de masse et d'énergie au travers d'une ouverture verticale. La fonction $f_{3,4}$ s'écrit comme suit :

$$F_{4-3}: V \left(T_{zh}^{ip_1}, T_{zh}^{ip_2}, T_{zb}^{ip_1}, T_{zb}^{ip_2}, \Delta P^{ip_1}, \Delta P^{ip_2}, Y_{o_2;zh}^{ip_1}, Y_{o_2;zh}^{ip_2}, Y_{o_2;zb}^{ip_1}, Y_{o_2;zb}^{ip_2}, Y_{f;zh}^{ip_1}, Y_{f;zh}^{ip_2}, Y_{f;zb}^{ip_1}, Y_{f;zb}^{ip_2}, Z^{ip_1}, Z^{ip_2}, H, W \right)$$

*Paramètres d'entrée de la routine V de CIFI 2009, ici à la fois des caractéristiques de la porte
et du gaz présent de part et d'autre de la porte*

X. RÉPARTITION DES VARIABLES EN CATÉGORIES ET INITIALISATION DE LEUR VALEUR

Répartitions des variables dans les catégories de variables

Cinq types de variables existent dans le formalisme :

- constante interne ;
- constante publique ;
- variable interne ;
- variable publique ;
- variable image.

Ces types de variables sont présentés dans le premier chapitre.

Pour finaliser le réseau, il convient de répartir les variables dans les catégories *ad hoc*. Dans la mesure où les variables sont connues, il est aisé de les répartir dans la bonne catégorie.

Initialisation des variables

Il convient ensuite d'initialiser la valeur des variables. Lorsque la variable est aléatoire, sa valeur initiale est fixée à ∞ et la valeur pour le scénario courant sera fixée lors du tir de la transition d'initialisation.

XI. VÉRIFICATION ET SIMPLIFICATION DES ANNOTATIONS DU RÉSEAU

XI.A Vérification

La vérification consiste tout d'abord à s'assurer de la cohérence de la numérotation des places et des transitions. Ensuite, il est nécessaire de résoudre d'éventuels conflits effectifs.

Rappel :

- a) Deux transitions T_1 et T_2 sont en **conflit structurel** si et seulement si elles ont au moins une place d'entrée en commun (le produit scalaire de leur vecteurs Pré est différent de zéro).
- b) Deux transitions T_1 et T_2 sont en **conflit effectif** pour un marquage M si et seulement si au même instant t, les transitions T_1 et T_2 :
 - sont en conflit structurel ;
 - leurs places d'entrées sont suffisamment marquées ;
 - et leurs conditions de sensibilisation sont simultanément validées.

Suite à un conflit effectif, le vecteur de marquage contient des composantes négatives, ce qui est interdit dans le formalisme de réseau de Petri.

Si les réseaux construits présentent des conflits structurels, alors il faut vérifier que ces conflits ne soient jamais effectifs. En cas de présence de conflits effectifs, les conflits doivent être résolus, tout en préservant le sens de ce qui est modélisé. Deux stratégies de résolution ont été identifiées.

La première consiste à fusionner les transitions en conflit en une seule, puis à concaténer :

- les conditions de sensibilisation par une condition « OU »
- les fonctions de jonction

Cette stratégie est impossible à mettre en œuvre si les transitions ne sont pas de même nature (p.ex. : une passive et une interne). De plus, cette stratégie peut rendre le dépouillement des résultats plus compliqué puisqu'il est impossible de savoir laquelle des transitions initialement en conflit a été à l'origine du tir de la transition résultant de la fusion.

La seconde consiste à dupliquer les places d'entrée des transitions en conflits.

Le choix de la stratégie à utiliser reste à l'appréciation du modélisateur, selon le cas. Toutefois, il faut savoir que la première stratégie est impossible si A ce jour, l'une au moins des deux stratégies a toujours été applicable. L'exemple suivant illustre la résolution des conflits.

Exemple : la ruine de la porte

A ce stade de la construction, le réseau de la porte présente un conflit dans la partie représentant la ruine de la porte. Ce conflit oppose les transitions $T_{7,3}$ et $T_{8,3}$. Étant donné que ces deux transitions ne sont pas de même nature (l'une est interne, l'autre est passive), elles ne peuvent pas être fusionnées. Seule la stratégie de duplication des places amont peut être retenue sur cet exemple. Cette stratégie est illustrée sur la Figure 99.

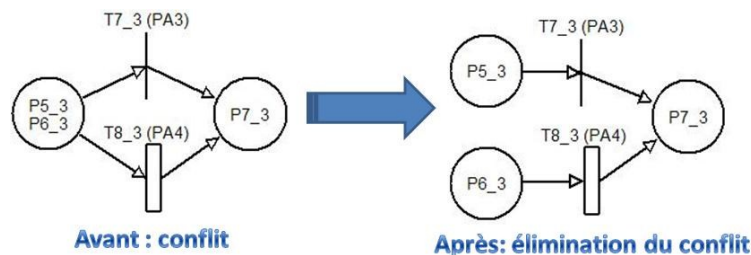


FIGURE 99 : RÉOLUTION D'UN CONFLIT PAR DUPLICATION DES PLACES AMONT

Exemple : le décès de l'occupant

Il en va de même de la partie représentant l'état de vie ou de décès de l'occupant. En effet, sur cette partie de réseau, les transitions $T_{6,2}$ et $T_{6,2bis}$ sont en conflit structurel. Ici, le conflit n'est pas effectif car l'occupant ne peut pas décéder au même moment dans la chambre et dans le couloir. Toutefois, afin de pouvoir illustrer la stratégie de fusion de transition, le conflit structurel est tout de même résolu sur la Figure 100. Lors du dépouillement des résultats, l'analyse seule du tir de $T_{6,2}$ ne permet pas de savoir si l'occupant est décédé dans le couloir ou dans la chambre.

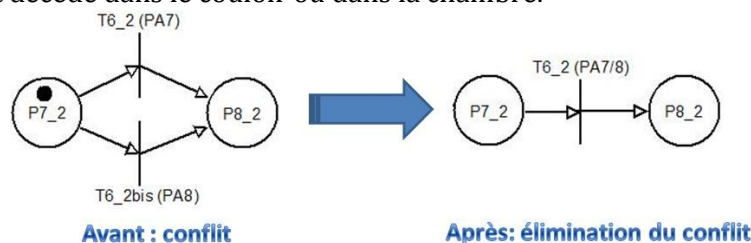


FIGURE 100 : RÉOLUTION D'UN CONFLIT PAR FUSION DES TRANSITIONS EN CONFLIT

XI.B

Simplifications des annotations

Si les réseaux sont codés manuellement, alors leur simplification s'avère utile. A l'inverse, si les réseaux sont codés automatiquement, l'absence de simplification ne perturbera pas le fonctionnement des réseaux.

Les simplifications :

- éliminent les variables inutiles ;
- simplifient les conditions de sensibilisation ;
- simplifient les conditions de jonction.

XI.B.a) Cas général

Pour un Pax, les simplifications consistent à supprimer de la liste des variables, de conditions de sensibilisation et des fonctions de jonction :

- la variable Δt_x si sa valeur vaut zéro ;
- les variables P_x ; P_{ox} si la valeur de P_x vaut 1 ;
- les variables R_x ; t_x si le PAx n'initie aucun autre PA du réseau.

XI.B.b) Cas particuliers

Dans certains cas, la structure du réseau est suffisante pour modéliser certains enchaînements de processus d'action. Ce cas ne peut se rencontrer qu'à condition que l'enchaînement concerne deux transitions apparaissant dans la même partie de réseau.

Exemple : le déplacement de l'occupant

Pour mieux comprendre ce cas, prenons l'exemple du déplacement de l'occupant. La Figure 101 présente l'extrait de réseau représentant ce déplacement, tel qu'il est à cette étape de la construction (c'est-à-dire avant la dernière simplification).

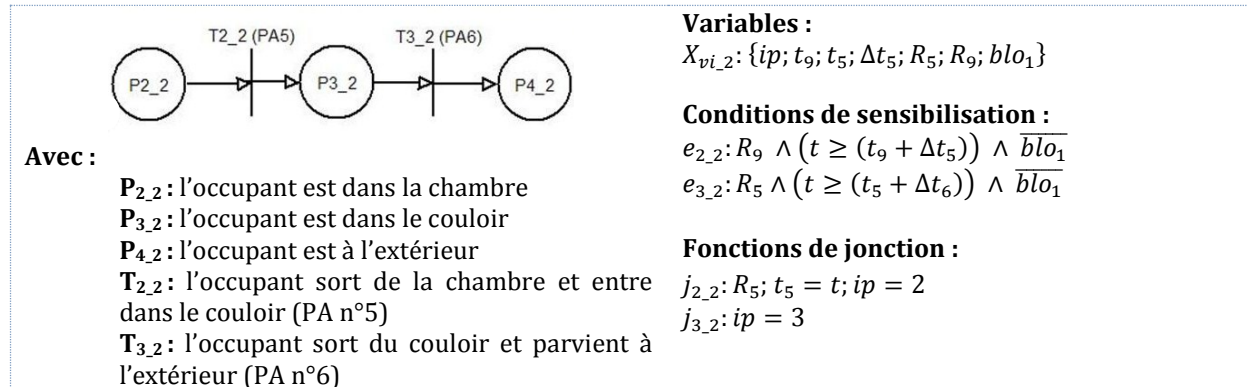


FIGURE 101 : PARTIE REPRÉSENTANT LE DÉPLACEMENT DE L'OCCUPANT

Dans ce réseau, l'occupant ne peut sortir du couloir (tir de T_{3,2}/ PA n°6) que s'il est préalablement sorti de la chambre (c'est-à-dire que si T_{2,2} a été tirée/ PA n°5). Dans cet exemple, il existe donc un enchaînement de processus entre le PA n° 5 et le PA n°6. En raison des règles de construction élaborée ci-avant, cet enchaînement est assuré par la variable booléenne R₅, qui prend la valeur booléenne « vrai » lors du tir de T_{2,2} (cf. j_{2,3}) et qui est utilisée pour conditionner le tir de T_{3,2} (cf. e_{3,2}). Or, dans cet exemple, le recours à cette variable **R₅** pour assurer l'enchaînement **n'est pas nécessaire**, tout simplement parce l'évolution du marquage est suffisante pour le faire. En effet, le tir de T_{2,2}, en marquant P_{3,2}, permet le tir de T_{3,2}. L'enchaînement est donc respecté sans avoir besoin

de recourir à une variable. Dans cet exemple, R_5 peut donc être éliminée de la condition de sensibilisation e_{3_2} et de la fonction de jonction j_{2_3} .

Après cet exemple, une loi générale peut être présentée. Pour y parvenir, considérons :

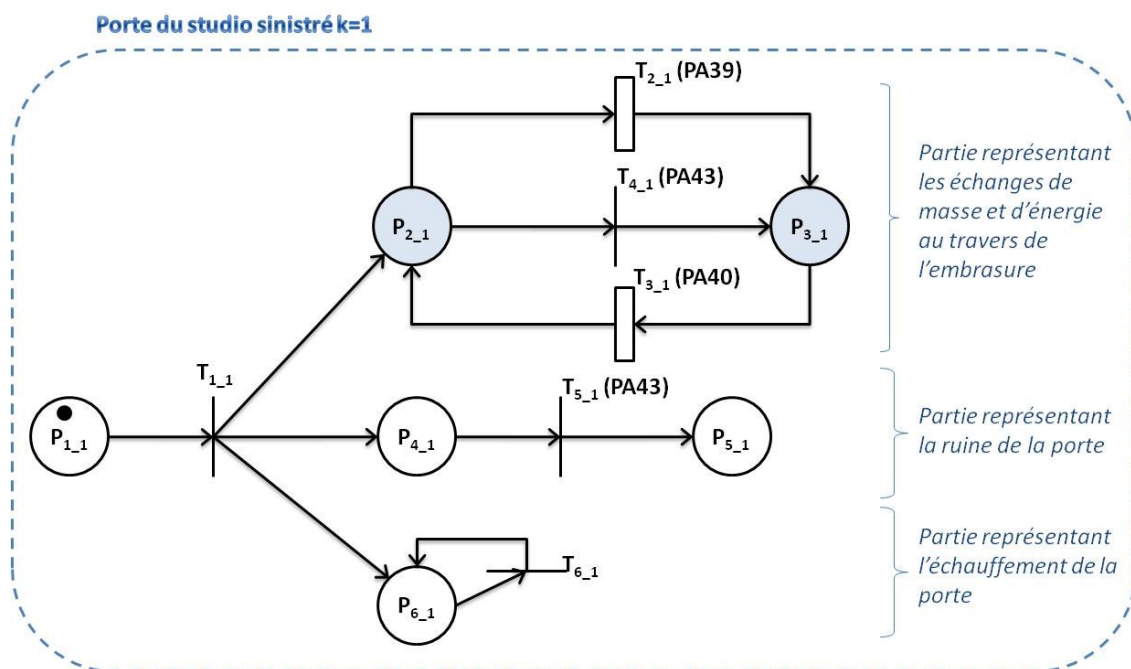
- deux transitions T_{j_k} et T_{l_k} , avec $j \neq l$
- une place P_{i_k}
- un processus d'action initiateur P_{Ax}

Si $\text{Pos}(P_{i_k}; T_{j_k}) = \text{Pre}(P_{i_k}; T_{l_k})$, alors P_{i_k} est à la fois la place de sortie de T_{l_k} et la place d'entrée de T_{j_k} . Dans ce cas, si e_{j_k} utilise une variable R_x dont la valeur est modifiée dans j_{l_k} , alors la variable R_x peut être supprimée de la condition de sensibilisation e_{j_k} et de la fonction de jonction j_{l_k} . En outre, si la variable R_x n'est utilisée nulle part ailleurs dans le réseau, elle est inutile et peut donc être totalement supprimée du réseau.

Annexe 3: QUELQUES RÉSEAUX DE PETRI DE L'APPLICATION PRATIQUE

I. RÉSEAU DE PETRI ÉLÉMENTAIRE REPRÉSENTANT LA PORTE DU STUDIO SINISTRÉ

I.A Structure et marquage initial



Avec :

- P_{1.1}** : place d'initialisation
- P_{2.1}** : la porte est fermée – calcul des flux de masse et d'énergie traversant l'espace sous la porte
- P_{3.1}** : la porte est ouverte – calcul des flux de masse et d'énergie traversant l'embrasure
- P_{4.1}** : la porte est intacte
- P_{5.1}** : la porte est ruinée
- P_{6.1}** : le ventail reçoit un flux énergétique en provenance du gaz avoisinant

- T_{1.1}** : transition d'initialisation servant au tir de variables aléatoires
- T_{2.1}** : ouverture de la porte (ici par l'occupant du studio sinistré)
- T_{3.1}** : fermeture de la porte (ici par l'occupant du studio sinistré)
- T_{4.1}** : ouverture de la porte suite à sa ruine
- T_{5.1}** : ruine thermique de la porte
- T_{6.1}** : calcul de l'énergie totale accumulée dans le ventail depuis le début du scénario

I.B Annotations

Variables :
 $X_{ci_1}: \{z_a; z_l; W; Z_0; h_f; C_d\}$
 $X_{vi_1}: \{e_p; e_{p,s}; t_{maj}; blo_1\}$
 $X_{cp_1}: \{ip_1; ip_2\}$
 $X_{vp_1}: \dots$
 $X_{im_1}: \{t; T_{zh}; T_{zb}; \Delta P; Y_{o_{2,zh}}; Y_{o_{2,zb}}; Y_{f,zh}; Y_{f,zb}; Z\}$
Fonctions de jonction :
 $j_{1_1}: e_{p,s} = A(300; 1500)$
 $j_{2_1}: \dots$
 $j_{3_1}: \dots$
 $j_{4_1}: \dots$
 $j_{5_1}: blo_1$
 $j_{6_1}: e_p = R(z_a; z_l; W); t_{maj} = t$
Conditions de sensibilisation :
 $e_{1_1}: \dots$
 $e_{2_1}: \overline{blo_1}$
 $e_{3_1}: \overline{blo_1}$
 $e_{4_1}: blo_1$
 $e_{5_1}: e_p \geq e_{p,s} \wedge \overline{blo_1}$
 $e_{6_1}: t \geq t_{maj} + 1$
Informations pour fusions :
 $\dots$
Fonctions continues :
 $F_{1_1}: \dots$
 $F_{2_1}: O \left(\begin{matrix} T_{zh}^{ip_1}; T_{zh}^{ip_2}; T_{zb}^{ip_1}; T_{zb}^{ip_2}; \Delta P^{ip_1}; \Delta P^{ip_2}; Y_{o_{2,zh}}^{ip_1}; Y_{o_{2,zh}}^{ip_2}; Y_{o_{2,zb}}^{ip_1}; Y_{o_{2,zb}}^{ip_2} \\ Y_{f,zh}^{ip_1}; Y_{f,zh}^{ip_2}; Y_{f,zb}^{ip_1}; Y_{f,zb}^{ip_2}; Z^{ip_1}; Z^{ip_2}; z_a; z_l; W; Z_0; h_f; C_d \end{matrix} \right)$
 $F_{3_1}: O \left(\begin{matrix} T_{zh}^{ip_1}; T_{zh}^{ip_2}; T_{zb}^{ip_1}; T_{zb}^{ip_2}; \Delta P^{ip_1}; \Delta P^{ip_2}; Y_{o_{2,zh}}^{ip_1}; Y_{o_{2,zh}}^{ip_2}; Y_{o_{2,zb}}^{ip_1}; Y_{o_{2,zb}}^{ip_2} \\ Y_{f,zh}^{ip_1}; Y_{f,zh}^{ip_2}; Y_{f,zb}^{ip_1}; Y_{f,zb}^{ip_2}; Z^{ip_1}; Z^{ip_2}; z_a; z_l; W; Z_0; h_f; C_d \end{matrix} \right)$
 $F_{4_1}: \dots$
 $F_{5_1}: \dots$
 $F_{6_1}: \dots$

I.C Nomenclature et valeurs initiales des variables

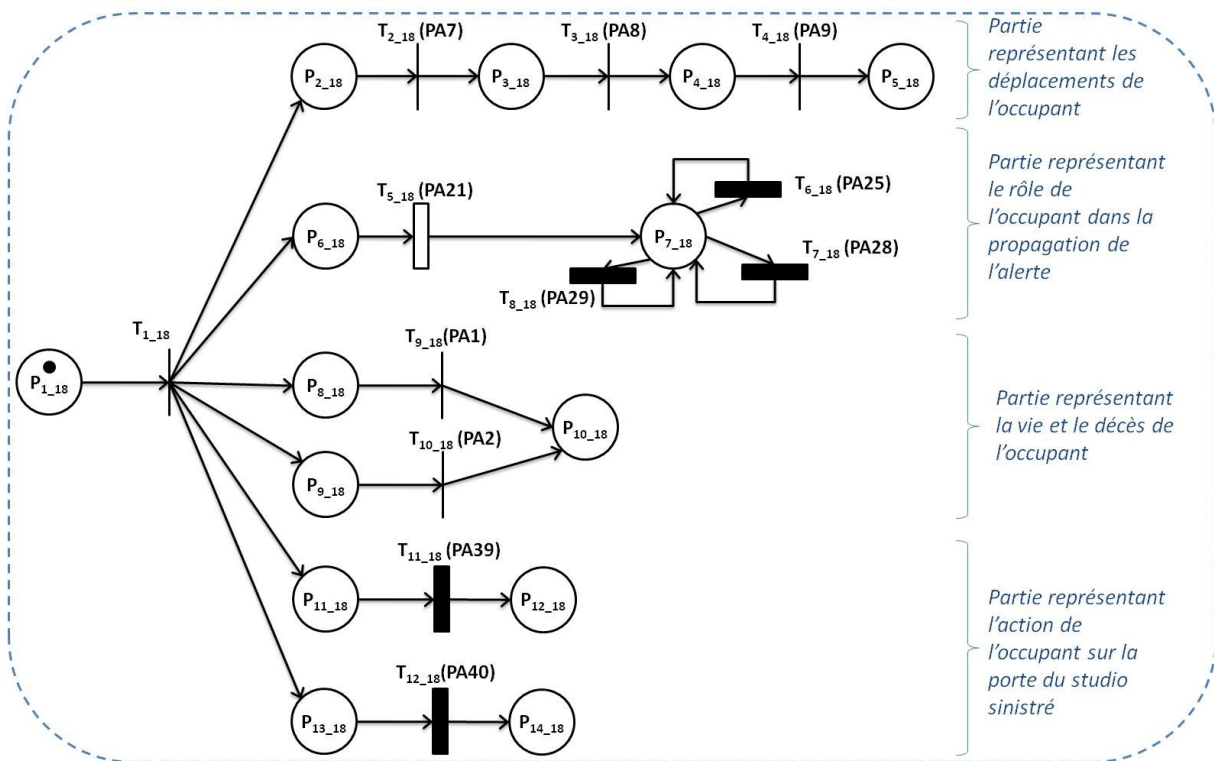
Variable	Description	Valeur initiale
$z_a; z_l; W$	les dimensions de la porte, c'est-à-dire respectivement sa hauteur d'allège, sa hauteur de linteau et sa largeur	Respectivement : 0,01 ; 2,05 et 0,9 mètres
Z_0	l'altitude de la porte par rapport au niveau du sol	7,5 m
h_f	la hauteur de fuite sous la porte, lorsque le ventail est fermé	0,01 m
C_d	un coefficient de perte de charges liées à la contraction de l'écoulement lors d'un changement de section	0,7
$e_p; e_{p,s}$	respectivement l'énergie accumulée dans la porte et l'énergie maximale supportée	∞
t_{maj}	une variable servant à tirer T_{6_1} toutes les secondes	0
$ip_1; ip_2$	les locaux mis en communication par la porte,	1 (studio sinistré) et 4 (couloir de l'aile n°1)
blo_1	une variable booléenne indiquant si la porte est ruinée ou non	$\overline{blo_1}$
t	l'instant courant	0
$T_{zh}; T_{zb}$	les températures des zones hautes et basses dans tous les locaux du bâtiment	fixé par CIFI 2009
$Y_{o_{2,zh}}; Y_{o_{2,zb}}; Y_{f,zh}; Y_{f,zb}$	les fractions massiques de dioxygène et de fuel des zones hautes et basses dans tous les locaux du bâtiment	fixé par CIFI 2009
Z	la hauteur d'interface thermique dans tous les locaux du bâtiment	fixé par CIFI 2009
ΔP	le différentiel de pression entre le local et une pression de référence dans tous les locaux du bâtiment	fixé par CIFI 2009

Routine ou fonction	Descriptif
R(...)	une routine CIFI 2009 calculant l'énergie accumulée dans la porte
O(...)	une routine CIFI 2009 calculant les échange de masse et d'énergie au niveau de cette porte
A(...)	une routine CIFI 2009 calculant l'énergie maximale supportée par le ventail
$U(x_1; x_2)$	une fonction de Scilab qui renvoie un nombre entier dans l'intervalle $[x_1; x_2]$, avec une loi de distribution uniforme

II. RÉSEAU DE PETRI ÉLÉMENTAIRE REPRÉSENTANT L'OCCUPANT DU STUDIO SINISTRÉ

II.A Structure et marquage initial

Occupant du studio sinistré k=18



Avec :

- P_{1_18} : place d'initialisation
- P_{2_18} : l'occupant est dans le studio sinistré
- P_{3_18} : l'occupant est dans le couloir de l'aile 1
- P_{4_18} : l'occupant est dans le hall
- P_{5_18} : l'occupant est à l'extérieur
- P_{6_18} : l'occupant ignore la présence du feu
- P_{7_18} : l'occupant a conscience de la présence du feu
- P_{8_18} : l'occupant est vivant
- P_{9_18} : l'occupant est vivant
- P_{10_18} : l'occupant est décédé
- P_{11_18} : l'occupant n'a pas encore ouvert la porte du studio sinistré
- P_{12_18} : l'occupant a déjà ouvert la porte du studio sinistré
- P_{13_18} : l'occupant n'a pas encore refermé la porte du studio sinistré

P_{14_18} : l'occupant a déjà refermé la porte du studio sinistré

T_{1_18} : transition d'initialisation servant au tir de variables aléatoires

T_{2_18} : l'occupant sort de la chambre et entre dans le couloir de l'aile 1 (PA n°7)

T_{3_18} : l'occupant sort du couloir de l'aile 1 et entre dans le hall (PA n°8)

T_{4_18} : l'occupant sort du hall et parvient à l'extérieur (PA n°9)

T_{5_18} : l'occupant est alerté – ici par le premier foyer (PA n°21)

T_{6_18} : l'occupant alerte les autres occupants des ailes n°1 et n°2 en criant (PA n°25)

T_{7_18} : l'occupant déclenche l'alarme (PA n°28)

T_{8_18} : l'occupant alerte le concierge (PA n°29)

T_{9_18} : l'occupant décède dans le studio sinistré (PA n°1)

T_{10_18} : l'occupant décède dans le couloir de l'aile n°1 ou dans le hall (PA n°2)

T_{11_18} : l'occupant ouvre la porte du studio sinistré (PA n°39)

T_{12_18} : l'occupant referme la porte du studio sinistré (PA n°40)

II.B Annotations

Variables :

$X_{ci_18} : \{\Delta t_{25}; P_{25}; P_{28}; P_{40}\}$

$X_{vi_18} : \{ip; \Delta t_7; \Delta t_8; \Delta t_9; \Delta t_{28}; \Delta t_{29}; t_7; t_8; t_9; t_{21}; Po_{25}; Po_{28}; Po_{40}; R_7; R_8; R_9; R_{21}; blo_1\}$

$X_{cp_18} : \dots$

$X_{vp_18} : \dots$

$X_{im_18} : \{t; T_{zh}; T_{zb}; Z\}$

Conditions de sensibilisation :

$e_{1_18} : \dots$

$e_{2_18} : R_{21} \wedge (t \geq (t_{21} + \Delta t_7)) \wedge \overline{blo_1}$

$e_{3_18} : (t \geq (t_7 + \Delta t_8)) \wedge \overline{blo_1}$

$e_{4_18} : (t \geq (t_8 + \Delta t_9)) \wedge \overline{blo_1}$

$e_{5_18} : \overline{blo_1}$

$e_{6_18} : R_7 \wedge \overline{blo_1}$

$e_{7_18} : R_8 \wedge (t \geq (t_8 + \Delta t_{28})) \wedge Po_{28} \wedge \overline{blo_1}$

$e_{8_18} : R_9 \wedge (t \geq (t_9 + \Delta t_{29})) \wedge \overline{blo_1}$

$e_{9_18} : [T_{zh}^{ip} \geq 200 \vee T_{zb}^{ip} \geq 50 \vee (T_{zh}^{ip} \geq 50 \wedge Z^{ip} \leq 1,80)] \wedge \overline{blo_1}$

$e_{10_18} : [T_{zh}^{ip} \geq 200 \vee T_{zb}^{ip} \geq 50 \vee (T_{zh}^{ip} \geq 50 \wedge Z^{ip} \leq 1,80)] \wedge \overline{blo_1}$

$e_{11_18} : R_7 \wedge \overline{blo_1}$

$e_{12_18} : Po_{40} \wedge \overline{blo_1}$

Fonctions de jonction :

$j_{1_18} : \{Po_{25} = U(1; 100) \leq (P_{25} \times 100); Po_{28} = U(1; 100) \leq (P_{28} \times 100); Po_{40} = U(1; 100) \leq (P_{40} \times 100)\}$

$j_{2_18} : R_7; t_7 = t; ip = 4$

$j_{3_18} : R_8; t_8 = t; ip = 6$

$j_{4_18} : R_9; t_9 = t; ip = 8$

$j_{5_18} : R_{21}; t_{21} = t;$

$j_{6_18} : \dots$

$j_{7_18} : \dots$

$j_{8_18} : \dots$

$j_{9_18} : blo_1$

$j_{10_18} : blo_1$

$j_{11_18} : \dots$

$j_{12_18} : \dots$

Fonctions continues :

$F_{1_18} : \dots$	$F_{8_18} : \dots$
$F_{2_18} : \dots$	$F_{9_18} : \dots$
$F_{3_18} : \dots$	$F_{10_18} : \dots$
$F_{4_18} : \dots$	$F_{11_18} : \dots$
$F_{5_18} : \dots$	$F_{12_18} : \dots$
$F_{6_18} : \dots$	$F_{13_18} : \dots$
$F_{7_18} : \dots$	$F_{14_18} : \dots$

Informations pour fusions :

$T_{6_18} \Rightarrow T_{5_19}$ et T_{5_20} , avec $k=19$ et $k=20$ les indices respectifs des objets « autres occupant de l'aile n°1 » et « autres occupant de l'aile n°2 »

$T_{7_18} \Rightarrow T_{2_25}$ avec $k=25$ l'indice de l'objet « alarme »

$T_{8_18} \Rightarrow T_{2_21}$ avec $k=21$ l'indice de l'objet « concierge »

$T_{11_18} \Rightarrow T_{2_1}$ avec $k=1$ l'indice de l'objet « porte du studio sinistré »

$T_{12_18} \Rightarrow T_{3_1}$ avec $k=1$ l'indice de l'objet « porte du studio sinistré »

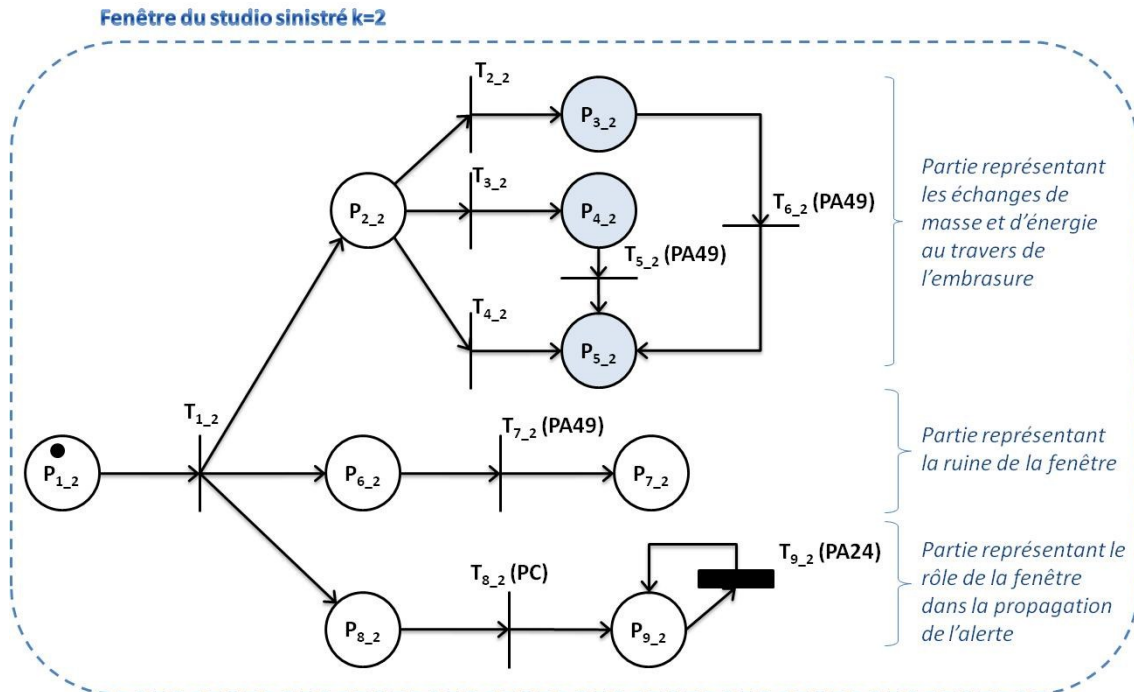
II.C Nomenclature et valeurs initiales des variables

Variable	Description	Valeur initiale
$\Delta t_7; \Delta t_8; \Delta t_9; \Delta t_{25}; \Delta t_{28}$	les délais de temporisation entre événement initiateur et occurrence des PA n°7, n°8, n°9, n°25 et n°28	Respectivement : $\infty; \infty; \infty; 5$ et ∞ sec
$P_{25}; P_{28}; P_{40}$	la fréquence d'occurrence du PA n°25, n°28, n°40	Respectivement : 0,8; 0,5 et 0,1
$PO_{25}; PO_{28}; PO_{40}$	une variable booléenne, traduisant la possibilité, pour le scénario courant, d'occurrence du PA n°25, n°28, n°40	$\overline{PO_{25}}; \overline{PO_{28}}; \overline{PO_{40}}$
$R_7; R_8; R_9; R_{21}$	variable booléenne, traduisant l'occurrence des PA n°7, n°8, n°9 et n°21	$\overline{R_7}; \overline{R_8}; \overline{R_9}; \overline{R_{21}}$
$t_7; t_8; t_9; t_{21}$	l'instant d'occurrence du PA n°7, n°8, n°9 et n°21	$\infty; \infty; \infty; \infty$
ip	local dans lequel l'occupant se trouve	1 (studio sinistré)
t	l'instant courant	0
$T_{zh}; T_{zb}$	les températures des zones hautes et basses dans tous les locaux du bâtiment	fixé par CIFI 2009
Z	la hauteur d'interface thermique dans tous les locaux du bâtiment	fixé par CIFI 2009

Routine ou fonction	Descriptif
$U(x_1; x_2)$	une fonction de Scilab qui renvoie un nombre entier dans l'intervalle $[x_1; x_2]$, avec une loi de distribution uniforme

III. RÉSEAU DE PETRI ÉLÉMENTAIRE REPRÉSENTANT LA FENÊTRE DU STUDIO SINISTRÉ

III.A Structure et marquage initial



Avec :

- P_{1,2}** : place d'initialisation des variables
- P_{2,2}** : place d'initialisation de l'état d'ouverture initial
- P_{3,2}** : la fenêtre est fermée – calcul des flux de masse et d'énergie traversant l'embrasure
- P_{4,2}** : la fenêtre est demi-ouverte – calcul des flux de masse et d'énergie traversant la moitié de l'embrasure
- P_{5,2}** : la fenêtre est ouverte – calcul des flux de masse et d'énergie traversant l'espace sous la fenêtre (fuites)
- P_{6,2}** : la fenêtre est intacte
- P_{7,2}** : la fenêtre est ruinée
- P_{8,2}** : aucun panache n'est sort par la fenêtre – il n'est pas détectable
- P_{9,2}** : un panache est sort par la fenêtre – il est détectable

- T_{1,2}** : transition d'initialisation servant au tir de variables aléatoires
- T_{2,2}** : transition d'initialisation de l'état de la fenêtre- la fenêtre est initialement fermée
- T_{3,2}** : transition d'initialisation de l'état de la fenêtre- la fenêtre est initialement demi-ouverte
- T_{4,2}** : transition d'initialisation de l'état de la fenêtre- la fenêtre est initialement ouverte
- T_{5,2}** : ouverture de la fenêtre suite à sa ruine (PA n°49)
- T_{6,2}** : ouverture de la fenêtre suite à sa ruine (PA n°49)
- T_{7,2}** : ruine thermique de la fenêtre (PA n°49)
- T_{8,2}** : panache visible – création d'un signal de danger (PC)
- T_{9,2}** : panache vu – ici par le passant- (PA n°24)

III.B Annotations

Variables :

 $X_{ci,2}: \{z_a; z_l; W; Z_0; h_f; C_d\}$
 $X_{vi,2}: \{blo_1; E_0; T_s; R_{49}\}$
 $X_{cp,2}: \{ip_1; ip_2\}$
 $X_{vp,2}: \dots$
 $X_{im,2}: \left\{ \begin{array}{l} t; T_{zh}; T_{zb}; \Delta P; Y_{o2,zh}; Y_{o2,zb}; \\ Y_{f,zh}; Y_{f,zb}; Z; \Delta P^e(X_{vp,17}); T^e(X_{vp,17}) \end{array} \right\}$

Conditions de sensibilisation :

 $e_{1,2}: \dots$
 $e_{4,2}: E_0 = 1$
 $e_{5,2}: E_0 = 2$
 $e_{6,2}: E_0 = 3$
 $e_{7,2}: [\Delta P^{ip_1} > 2000 \vee T_{zh}^{ip_1} > T_s \vee T_{zb}^{ip_1} > T_s] \wedge \overline{blo_1}$
 $e_{8,2}: Z^{ip_1} < [(z_l \wedge E_0 = 2) \vee (E_0 = 3 \vee R_{49})]$
 $e_{9,2}: \dots$

Fonctions continues :

 $F_{1,2}: \dots$
 $F_{2,2}: O \left(\begin{array}{l} T_{zh}^{ip_1}; T_{zb}^{ip_1}; \Delta P^{ip_1}; Y_{o2,zh}^{ip_1}; Y_{o2,zb}^{ip_1}; Y_{f,zh}^{ip_1}; Y_{f,zb}^{ip_1}; \\ Z^{ip_1}; z_a; z_l; W; Z_0; h_f; C_d; \Delta P^e(X_{vp,17}); T^e(X_{vp,17}) \end{array} \right)$
 $F_{3,2}: O \left(\begin{array}{l} T_{zh}^{ip_1}; T_{zb}^{ip_1}; \Delta P^{ip_1}; Y_{o2,zh}^{ip_1}; Y_{o2,zb}^{ip_1}; Y_{f,zh}^{ip_1}; Y_{f,zb}^{ip_1}; \\ Z^{ip_1}; z_a; z_l; W; Z_0; h_f; C_d; \Delta P^e(X_{vp,17}); T^e(X_{vp,17}) \end{array} \right)$
 $F_{4,2}: O \left(\begin{array}{l} T_{zh}^{ip_1}; T_{zb}^{ip_1}; \Delta P^{ip_1}; Y_{o2,zh}^{ip_1}; Y_{o2,zb}^{ip_1}; Y_{f,zh}^{ip_1}; Y_{f,zb}^{ip_1}; \\ Z^{ip_1}; z_a; z_l; W; Z_0; h_f; C_d; \Delta P^e(X_{vp,17}); T^e(X_{vp,17}) \end{array} \right)$
 $F_{5,2}: \dots$
 $F_{6,2}: \dots$
 $F_{7,2}: \dots$
 $F_{8,2}: \dots$
 $F_{9,2}: \dots$

Fonctions de jonction :

 $j_{1,2}: T_s = 273,15 + U(300; 400); E_0 = U(1; 3)$
 $j_{2,2}: \dots$
 $j_{3,2}: \dots$
 $j_{4,2}: \dots$
 $j_{5,2}: \dots$
 $j_{6,2}: \dots$
 $j_{7,2}: blo_1; R_{49}$
 $j_{8,2}: \dots$
 $j_{9,2}: \dots$

Informations pour fusions :

 $T_{9,2} \Rightarrow T_{2,23}$ avec k=23 l'indice de l'objet « passant »

III.C Nomenclature et valeurs initiales des variables

Variable	Description	Valeur initiale
$z_a; z_l; W$	les dimensions de la fenêtre, c'est-à-dire respectivement sa hauteur d'allège, sa hauteur de linteau et sa largeur	Respectivement : 0,01 ; 2,08 et 1,6 mètres
Z_0	l'altitude de la fenêtre par rapport au niveau du sol	7,5 m
h_f	la hauteur de fuite sous la porte, lorsque le ventail est fermé	0,01 m
C_d	un coefficient de perte de charges liées à la contraction de l'écoulement lors d'un changement de section	0,7
$ip_1; ip_2$	les locaux mis en communication par la fenêtre	1 (studio sinistré) et 8 (l'extérieur)
blo_1	une variable booléenne indiquant si la fenêtre est ruinée ou non	$\overline{blo_1}$
E_0	l'état d'ouverture initial de la fenêtre, vaut 1 pour fermée, 2 pour demi-ouverte et 3 pour ouvert	∞

Variable	Description	Valeur initiale
T_s	la température maximale supportée par la fenêtre	∞
R_{49}	variable booléenne, traduisant l'occurrence des PA n°49	$\overline{R_{49}}$
t	l'instant courant	0
$T_{zh}; T_{zb}$	les températures des zones hautes et basses dans tous les locaux du bâtiment	fixé par CIFI 2009
$Y_{O_{2,zh}}; Y_{O_{2,zb}}; Y_{f,zh}; Y_{f,zb}$	les fractions massiques de dioxygène et de fuel des zones hautes et basses dans tous les locaux du bâtiment	fixé par CIFI 2009
Z	la hauteur d'interface thermique dans tous les locaux du bâtiment	fixé par CIFI 2009
ΔP	le différentiel de pression entre le local et une pression de référence dans tous les locaux du bâtiment	fixé par CIFI 2009
$\Delta P^e(X_{vp,17})$	le différentiel de pression sur les façades du bâtiment engendré par le vent, lue chez l'objet k=17	fixée dans l'objet k=17, c.à.d. « l'extérieur »
$T^e(X_{vp,17})$	la température extérieure, lue chez l'objet k=17	fixée dans l'objet k=17, c.à.d. « l'extérieur »

Routine ou fonction	Descriptif
$O(\dots)$	une routine CIFI 2009 calculant les échange de masse et d'énergie au niveau de cette fenêtre
$U(x_1; x_2)$	une fonction de Scilab qui renvoie un nombre entier dans l'intervalle $[x_1; x_2]$, avec une loi de distribution uniforme

INDEX

LISTE DES ILLUSTRATIONS

Figures

FIGURE 1 : RÉPARTITION DES INCENDIES EN FRANCE, POUR L'ANNÉE 2009	6
FIGURE 2 : CLASSIFICATION DES DIFFÉRENTS TYPES DE MODÈLES.....	14
FIGURE 3 : DÉMARCHE GÉNÉRIQUE D'UNE MÉTHODE D'ANALYSE DE RISQUE EN ISI	17
FIGURE 4 : RÉACTION DES TYPES DE DÉTECTEURS.....	22
FIGURE 5 : LES ENTRÉES-SORTIES DE SCHEMA-SI	24
FIGURE 6 : PRINCIPAUX TERMES DE FLUX MASSIQUE (À GAUCHE) ET ÉNERGÉTIQUE (À DROITE) ÉCHANGÉS ENTRE ZONES, POUR UN SEUL FOYER DANS UN LOCAL OUVERT PAR UNE PORTE	25
FIGURE 7 : DIAGRAMME DES ÉCHANGES ENTRE ZONES DANS UN LOCAL OÙ UN FOYER EST ACTIF	26
FIGURE 8 : ORGANISATION D'UN CALCUL AVEC CIFI 2009	27
FIGURE 9 : STRUCTURE D'UN RÉSEAU DE PETRI.....	28
FIGURE 10 : MATHÉMATISATION DE LA STRUCTURE D'UN RÉSEAU DE PETRI.....	29
FIGURE 11 : MARQUAGE D'UN RÉSEAU DE PETRI	29
FIGURE 12 : MATHÉMATISATION DU MARQUAGE D'UN RÉSEAU DE PETRI.....	30
FIGURE 13 : ÉVOLUTION DU MARQUAGE D'UN RÉSEAU DE PETRI.....	30
FIGURE 14 : MATHÉMATISATION DE L'ÉVOLUTION DU MARQUAGE D'UN RÉSEAU DE PETRI	31
FIGURE 15 : UN EXEMPLE DE RÉSEAU DE PETRI PRÉDICAT-TRANSITION DIFFÉRENTIEL	32
FIGURE 16 : UN EXEMPLE DE FUSION DE TRANSITION	36
FIGURE 17 : UN EXEMPLE DE PARTAGE DE VARIABLE	38
FIGURE 18 : ÉTAPE 1 DE L'ASSEMBLAGE DES RÉSEAUX ÉLÉMENTAIRES - IDENTIFICATION DES OBJETS ET DES TRANSITIONS CONCERNÉS.....	38
FIGURE 19 : ÉTAPE 2 DE L'ASSEMBLAGE DES RÉSEAUX ÉLÉMENTAIRES - DUPLICATION DES TRANSITIONS	39
FIGURE 20 : ÉTAPE 3 DE L'ASSEMBLAGE DES RÉSEAUX ÉLÉMENTAIRES - FUSION DES TRANSITIONS	39
FIGURE 21 : ILLUSTRATION D'UN CONFLIT STRUCTUREL	40
FIGURE 22 : ILLUSTRATION D'UN CONFLIT EFFECTIF.....	40
FIGURE 23 : ILLUSTRATION DU PARALLÉLISME STRUCTUREL	41
FIGURE 24 : ILLUSTRATION DU PARALLÉLISME FONCTIONNEL	41
FIGURE 25 : ORGANISATION D'UN CALCUL AVEC SCHEMA-SI	43
FIGURE 26 : LE SYSTÈME GÉNÉRAL (LE MOIGNE, 2006)	45
FIGURE 27 : PRINCIPE DE LA SYSTÉMOGRAPHIE (À DROITE) ET SYSTÈME GÉNÉRAL UTILISÉ DANS LA SYSTÉMOGRAPHIE (À GAUCHE)....	49
FIGURE 28 : MODÈLE GRAPHIQUE PROPOSÉ DANS LE MACROSCOPE (DE ROSNAY, 1975)	50
FIGURE 29 : LE MODÈLE DU PROCESSUS DE DANGER	51
FIGURE 30 : MISE D'UN SOUS-SYSTÈME SOUS FORME DE BOITE NOIRE – THÉORIE (EN BLEU) ET EXEMPLE (EN ROUGE).....	52
FIGURE 31 : CONSTRUCTION DE SCÉNARIOS COURTS PAR ENCHAÎNEMENTS DE PROCESSUS – THÉORIE (EN BLEU) ET EXEMPLE (EN ROUGE)	52
FIGURE 32 : CONSTRUCTION DE SCÉNARIOS LONGS PAR ENCHAÎNEMENTS DE PROCESSUS – THÉORIE	53
FIGURE 33 : ORGANISATION D'UNE MÉTHODE IDÉALE	59
FIGURE 34 : EXEMPLE DE PRÉSENTATION PERMETTANT DE COMPARER LES FRÉQUENCES D'OCCURRENCE D'E.N.S. PAR STRATÉGIE ...	65
FIGURE 35 : EXEMPLE DE CODE COULEUR DE COMPARER LES FRÉQUENCES D'OCCURRENCE D'E.N.S. PAR STRATÉGIE	66
FIGURE 36 : GRILLE « FRÉQUENCE X GRAVITÉ »	66
FIGURE 37 : EXEMPLE DE PRÉSENTATION PERMETTANT DE COMPARER LES FRÉQUENCES D'OCCURRENCE D'E.N.S. PAR STRATÉGIE ...	67
FIGURE 38 : EXEMPLE DE PRÉSENTATION PERMETTANT DE COMPARER LES FRÉQUENCES D'OCCURRENCE D'E.N.S. PAR STRATÉGIE – AJOUT D'UNE LIMITE D'ACCEPTABILITÉ	67
FIGURE 39 : LA MÉTHODE ISI-SYSTEMA	70
FIGURE 40 : LES SYMBOLES « BOÎTES » FONCTIONNALISÉS	79
FIGURE 41 : LE SYMBOLE CONNEXION	79
FIGURE 42 : LE SYMBOLE FLÈCHE	79

FIGURE 43 : LE MODÈLE DU PROCESSUS D’ACTION.....	80
FIGURE 44 : EXEMPLE DE REPRÉSENTATION DU FEU ET DE LA FUMÉE DANS UN LOCAL FERMÉ.....	83
FIGURE 45 : EXEMPLE DE REPRÉSENTATION DU FEU ET DE LA FUMÉE DANS DEUX LOCAUX OUVERTS SUR L’ENVIRONNEMENT	85
FIGURE 46 : EXEMPLE DE REPRÉSENTATION DE LA PRISE DE CONSCIENCE DU DANGER PAR UN INDIVIDU	87
FIGURE 47 : EXEMPLE DE REPRÉSENTATION DU DÉPLACEMENT D’UNE PERSONNE.....	88
FIGURE 48 : EXEMPLE DE REPRÉSENTATION DE LA PROPAGATION DE L’ALERTE.....	90
FIGURE 49 : EXEMPLE DE REPRÉSENTATION DU SAUVETAGE D’UNE PERSONNE	92
FIGURE 50 : EXEMPLE DE REPRÉSENTATION DE L’ACTIVITÉ D’UN DÉTECTEUR	95
FIGURE 51 : EXEMPLE DE REPRÉSENTATION DE L’ACTIVITÉ D’UNE TÊTE DE SPRINKLAGE.....	96
FIGURE 52 : EXEMPLE DE REPRÉSENTATION DE L’ACTIVITÉ D’UNE PORTE	98
FIGURE 53 : EXEMPLE DE REPRÉSENTATION DE L’ACTIVITÉ D’UNE ALARME	99
FIGURE 54 : LES INTERACTIONS ENTRE PROCESSUS DISCRETS.....	102
FIGURE 55 : EXEMPLE TRÈS SIMPLE DE MATRICE D’INTERACTION	102
FIGURE 56 : EXEMPLE D’ARBRE DÉDUCTIF.....	105
FIGURE 57 : EXEMPLE D’ARBRE INDUCTIF	106
FIGURE 58 : LA PORTE DANS LA VUE PHYSIQUE	111
FIGURE 59 : L’OCCUPANT DANS LA VUE MOUVEMENT DES PERSONNES	111
FIGURE 60 : L’OCCUPANT DANS LA VUE INFORMATION	112
FIGURE 61 : PROCESSUS D’ACTION IMPLIQUÉS DANS LES EXEMPLES	113
FIGURE 62 : RDPE REPRÉSENTANT LE FERME-PORTE	114
FIGURE 63 : RDPE REPRÉSENTANT L’OCCUPANT	116
FIGURE 64 : RDPE REPRÉSENTANT LA PORTE	119
FIGURE 65 : PARALLÈLE ENTRE LE MODÈLE SYSTÉMIQUE ET LA PARTIE DE RÉSEAU REPRÉSENTANT LE DÉPLACEMENT DE L’OBJET	122
FIGURE 66 : PARALLÈLE ENTRE LE MODÈLE SYSTÉMIQUE ET LA PARTIE DE RÉSEAU REPRÉSENTANT LE RÔLE DE L’OBJET DANS LA PROPAGATION DE L’ALERTE.....	123
FIGURE 67 : PARALLÈLE ENTRE LE MODÈLE SYSTÉMIQUE ET LA PARTIE DE RÉSEAU REPRÉSENTANT LES INTERACTIONS CONTINUES DE L’OBJET AVEC LE MODÈLE AÉRAULIQUE.....	124
FIGURE 68 : PARALLÈLE ENTRE LE MODÈLE SYSTÉMIQUE ET LA PARTIE DE RÉSEAU REPRÉSENTANT LA DÉGRADATION DE L’OBJET.....	125
FIGURE 69 : PRÉSENTATION GÉNÉRALE DE LA DÉMARCHE DE CONSTRUCTION DE RÉSEAUX DE PETRI.....	126
FIGURE 70 : IDENTIFICATION DES ESPACES ET DES OUVRANTS CONCERNÉS PAR L’ÉTUDE	135
FIGURE 71 : CRITÈRES RETENUS POUR DÉFINIR LA LÉTALITÉ.....	138
FIGURE 72 : VUE PHYSIQUE DE L’APPLICATION PRATIQUE	141
FIGURE 73 : VUE INFORMATION DE L’APPLICATION PRATIQUE.....	144
FIGURE 74 : VUE MOUVEMENT DE PERSONNES DE L’APPLICATION PRATIQUE	146
FIGURE 75 : MATRICE D’INTERACTIONS ENTRE PROCESSUS D’ACTION DE L’APPLICATION PRATIQUE	158
FIGURE 76 : LÉGENDE ET ABRÉVIATIONS DES ARBRES D’INTERACTIONS.....	159
FIGURE 77 : ARBRE D’INTERACTION DÉBUTANT PAR LA DÉTECTION PAR L’OCCUPANT	160
FIGURE 78 : ARBRE D’INTERACTION DÉBUTANT PAR LA DÉTECTION PAR LE PASSANT	161
FIGURE 79 : ARBRE D’INTERACTION DÉBUTANT PAR LA DÉTECTION PAR LE DÉTECTEUR	161
FIGURE 80 : ARBRE D’INTERACTION TERMINANT PAR LA SORTIE DES AUTRES OCCUPANTS DE L’AILE 1 DE L’ÉTAGE ÉTUDIÉ.....	162
FIGURE 81 : ARBRE D’INTERACTION TERMINANT PAR L’EXTINCTION DU FEU PAR LES SECOURS	163
FIGURE 82 : HISTOGRAMME DE RÉPARTITION TEMPORELLE DE L’E.N.S. N°1 POUR LA STRATÉGIE D	173
FIGURE 83 : HISTOGRAMME DE RÉPARTITION TEMPORELLE DE L’E.N.S. N°2 POUR LA STRATÉGIE D	174
FIGURE 84 : HISTOGRAMME DE RÉPARTITION TEMPORELLE DE L’E.N.S. N°4 POUR LA STRATÉGIE D	175
FIGURE 85 : L’OCCUPANT DANS LA VUE MOUVEMENT DE PERSONNE	195
FIGURE 86 : PLACES NÉCESSAIRES POUR REPRÉSENTER LE DÉPLACEMENT DE L’OCCUPANT.....	195
FIGURE 87 : L’OCCUPANT DANS LA VUE INFORMATION	196
FIGURE 88 : PLACES NÉCESSAIRES POUR REPRÉSENTER L’ÉTAT D’ALERTE DE L’OCCUPANT.....	196
FIGURE 89 : LA PORTE DANS LA VUE PHYSIQUE	197
FIGURE 90 : PLACES NÉCESSAIRES POUR REPRÉSENTER L’IMPACT DE LA POSITION DE LA PORTE SUR LES ÉCHANGES DE MASSE ET D’ÉNERGIE AU TRAVERS DE L’EMBRASURE	197
FIGURE 91 : PLACES NÉCESSAIRES POUR REPRÉSENTER LE DÉCÈS DE L’OCCUPANT	199
FIGURE 92 : PLACES NÉCESSAIRES POUR REPRÉSENTER LA RUINE DE LA PORTE	199
FIGURE 93 : IDENTIFICATION DES TRANSITIONS ET DES ARCS – DÉPLACEMENT DE L’OCCUPANT.....	201

FIGURE 94 : IDENTIFICATION DES TRANSITIONS ET DES ARCS – COMMUNICATION DE L'OCCUPANT	202
FIGURE 95 : IDENTIFICATION DES TRANSITIONS ET DES ARCS – FERMETURE DE LA PORTE PAR LE FERME-PORTE.....	203
FIGURE 96 : IDENTIFICATION DES TRANSITIONS ET DES ARCS – OUVERTURE DE LA PORTE PAR L'OCCUPANT	204
FIGURE 97 : IDENTIFICATION DES TRANSITIONS ET DES ARCS - MODÉLISATION DE L'ÉTAT D'UNE PORTE	207
FIGURE 98 : AJOUT DE TRANSITIONS D'INITIALISATION DE L'ÉTAT INITIAL D'UN OBJET	210
FIGURE 99 : RÉOLUTION D'UN CONFLIT PAR DUPLICATION DES PLACES AMONT	222
FIGURE 100 : RÉOLUTION D'UN CONFLIT PAR FUSION DES TRANSITIONS EN CONFLIT	222
FIGURE 101 : PARTIE REPRÉSENTANT LE DÉPLACEMENT DE L'OCCUPANT	223

Tableaux

TABLEAU 1 : PRINCIPALES SOURCES DE DANGER POUR LES PERSONNES ET LES BIENS LORS D'UN FEU DANS UN BÂTIMENT	5
TABLEAU 2 : CRITÈRES DE CLASSIFICATION DES SYSTÈMES EN SYSTÈME COMPLEXE OU EN SYSTÈME COMPLIQUÉ.....	46
TABLEAU 3 : EXEMPLES DE QUESTIONS ILLUSTRANT LA DIFFICULTÉ D'ÉVALUER LE RISQUE INCENDIE.....	58
TABLEAU 4 : OBJECTIFS FONDAMENTAUX ET SOUS-OBJECTIFS DE SÉCURITÉ INCENDIE.....	61
TABLEAU 5 : ÉTUDE COMPARATIVE DES LANGAGES ISSUS DE LA LITTÉRATURE.....	75
TABLEAU 6 : LES CINQ PROCESSUS ÉLÉMENTAIRES UTILISÉS POUR DÉCOUPER L'ACTIVITÉ D'UN SYSTÈME	77
TABLEAU 7 : LES TROIS VUES IMPLIQUÉES DANS LA DESCRIPTION D'UNE TRAME	100
TABLEAU 8 : DIFFÉRENTES PARTIES POUVANT APPARAÎTRE LORS DE LA CONSTRUCTION DES RÉSEAUX	121
TABLEAU 9 : LES CINQ PHASES DE CONSTRUCTION DE LA STRUCTURE DU RÉSEAU REPRÉSENTANT LE FERME-PORTE.....	127
TABLEAU 10 : LES CINQ PHASES DE CONSTRUCTION DES ANNOTATIONS DU RÉSEAU REPRÉSENTANT LE FERME-PORTE	129
TABLEAU 11 : LA PHASE DE VÉRIFICATION ET DE SIMPLIFICATION DU RÉSEAU REPRÉSENTANT LE FERME-PORTE.....	131
TABLEAU 12 : E.N.S. ET CRITÈRES DE PERFORMANCE ASSOCIÉS POUR L'APPLICATION PRATIQUE	138
TABLEAU 13 : VARIABLES NÉCESSAIRES POUR CONSTRUIRE DES CRITÈRES DE LÉTALITÉ.....	138
TABLEAU 14 : PROCESSUS D'ACTION DE L'APPLICATION PRATIQUE – VULNÉRABILITÉ DES OCCUPANTS	148
TABLEAU 15 : PROCESSUS D'ACTION DE L'APPLICATION PRATIQUE – DÉPLACEMENTS DE L'OCCUPANT DU STUDIO SINISTRÉ	149
TABLEAU 16 : PROCESSUS D'ACTION DE L'APPLICATION PRATIQUE – DÉPLACEMENTS DES OCCUPANTS DES AUTRES STUDIOS DE L'AILE N°1	150
TABLEAU 17 : PROCESSUS D'ACTION DE L'APPLICATION PRATIQUE – DÉPLACEMENTS DES OCCUPANTS DES AUTRES STUDIOS DE L'AILE N°2	150
TABLEAU 18 : PROCESSUS D'ACTION DE L'APPLICATION PRATIQUE – DÉPLACEMENTS DE L'ÉQUIPE DE SECOURS.....	151
TABLEAU 19 : PROCESSUS D'ACTION DE L'APPLICATION PRATIQUE – DÉTECTION.....	151
TABLEAU 20 : PROCESSUS D'ACTION DE L'APPLICATION PRATIQUE – PROPAGATION DE L'ALARME	153
TABLEAU 21 : PROCESSUS D'ACTION DE L'APPLICATION PRATIQUE – ACTIVITÉ DES FOYERS.....	153
TABLEAU 22 : PROCESSUS D'ACTION DE L'APPLICATION PRATIQUE – ACTIONNEMENT DES VENTILATEURS	154
TABLEAU 23 : PROCESSUS D'ACTION DE L'APPLICATION PRATIQUE – RUINE DES PORTES	155
TABLEAU 24 : PROCESSUS D'ACTION DE L'APPLICATION PRATIQUE – RUINE DES FENÊTRES	156
TABLEAU 25 : RDPE CONSTRUITS POUR LA TRAME ET INDICES DES OBJETS REPRÉSENTÉS.....	164
TABLEAU 26 : COMPARAISON DES FRÉQUENCES D'OCCURRENCE D'E.N.S. PAR STRATÉGIE.....	170
TABLEAU 27 : COMPARAISON DES FRÉQUENCES D'OCCURRENCE D'E.N.S. PAR LIEU ET PAR STRATÉGIE	171
TABLEAU 28 : SEUILS DE SIGNIFICATIVITÉ UTILISÉS POUR COMPARER LES FRÉQUENCES D'OCCURRENCE D'E.N.S. PAR STRATÉGIE	172
TABLEAU 29 : RÉPARTITION SPATIALE DE L'E.N.S N°1 SELON L'ÉTAT DE LA PORTE DU STUDIO SINISTRÉ POUR LA STRATÉGIE D	173
TABLEAU 30 : EXEMPLE DE FONCTIONS CONTINUES	220
TABLEAU 31 : TERMINOLOGIE RELATIVE À LA MÉTHODOLOGIE ET À LA MODÉLISATION	236
TABLEAU 32 : TERMINOLOGIE UTILISÉE EN GESTION DES RISQUES	238
TABLEAU 33 : TERMINOLOGIE UTILISÉE EN GESTION DU RISQUE INCENDIE DANS LES BÂTIMENTS	239
TABLEAU 34 : TERMINOLOGIE SYSTÉMIQUE ET SPÉCIFIQUE AU LANGAGE ISI-SYSTEMA.....	241
TABLEAU 35 : TERMINOLOGIE RELATIVE À L'OUTIL SCHEMA-SI ET AUX RÉSEAUX DE PETRI	243

GLOSSAIRE

Les références citées correspondent aux auteurs proposant des définitions dans leurs ouvrages. Ils n'ont pas toujours la paternité de ces définitions. Le glossaire est organisé en cinq tableaux construits de manière à classer les définitions par thématique.

Terminologie relative à la méthodologie et à la modélisation	
Démarche	Une démarche est l'organisation de la méthode au sens de l'ordre des actions à entreprendre.
Ingénierie dirigée par les modèles (Thiry, et al., 2009)	Un domaine de l'informatique mettant à disposition des outils, concepts et langages pour créer et transformer des modèles.
Langage de modélisation	Un formalisme utilisé pour représenter un modèle (p. ex. : un ensemble de traits, de flèches, de couleurs, de symboles, de nombres... auxquels une signification est associée).
Méthode	Une méthode est une manière de conduire et d'exprimer sa pensée conformément à des principes édifiés ou positionnement méthodologique.
Méthode de modélisation	Un ensemble structuré permettant l'élaboration d'un modèle en proposant des opérations à accomplir et en signalant certains errements à éviter.
Méthodologie	Discipline visant à l'étude des pratiques ou méthodes utilisées pour résoudre un problème défini
Modèle	Une représentation abstraite de la réalité construite dans un but défini (p. ex : un plan, un organigramme, un système d'équations).
Outil	Procédé technique de calcul ou d'expérimentation utilisé pour la mise en œuvre des suites d'opération d'une méthode.
Positionnement méthodologique	Le positionnement méthodologique est l'ensemble des principes édifiés pour résoudre un problème défini. Il s'agit de la base sur laquelle s'appuyer pour concevoir une méthode.

TABLEAU 31 : TERMINOLOGIE RELATIVE À LA MÉTHODOLOGIE ET À LA MODÉLISATION

Terminologie utilisée en gestion des risques	
Accident	Réalisation d'un événement ayant des effets dommageables pour un individu, une population, un écosystème, un système matériel ou symbolique. Réalisation d'un E.N.S.
Cible de danger ou enjeux	Unité qui peut être dégradée par le flux de danger, il peut s'agir de personnes, de biens, de patrimoine historique ou naturel, etc.
Danger (Perilhon, 2003)	Concept qualitatif et descriptif traduisant la potentialité d'un système à produire un ou plusieurs E.N.S.
Défaillance (Talon, 2006)	Un indicateur de l'état performanciel d'un produit. Un produit est défaillant lorsque le seuil performanciel minimum d'au moins une ou d'une combinaison de ces fonctions principales n'est plus atteint.
Dégradation	Une dégradation est une modification des propriétés et/ou de la géométrie d'un composant par rapport à ces propriétés et/ou sa géométrie initiales.
Domage	Une perte, une destruction, une atteinte corporelle, un manque à gagner.
Événement	Phénomène contingent, localisé, en un endroit, à un instant donné
Événement non souhaité (E.N.S.) (Perilhon, 2003)	Événement d'un scénario ayant un effet destructeur sur l'un ou plusieurs enjeux à protéger.
Flux de danger (Perilhon, 2003)	Un flux émis par un système source, lorsqu'un événement initiateur le génère. S'il atteint le système cible, le risque est réalisé. C'est l'événement non souhaité.
Gravité	Ampleur des dommages causés à des cibles.
Perception du risque (Perilhon, 2003)	Manière dont un risque est perçu par un individu, un groupe d'individus, une population. En toute rigueur, elle devrait être fonction de la nature du danger, de sa probabilité, de ses conséquences, de son estimation et de sa maîtrise. La perception du risque est cependant très liée à la culture des individus et des populations.
Phénomène	Fait observé en partie dans son déroulement ou comme manifestation de quelque chose d'autre. Ce qui relève du monde sensible.
Prévention	Stratégie de sécurité dont l'objectif est la diminution de la fréquence d'occurrence d'un accident.
Protection	Stratégie de sécurité dont l'objectif est la minimisation de la gravité d'un accident.
Risque (Perilhon, 2003)	Le risque (R) est défini comme un concept quantitatif dont l'estimation fait intervenir les notions : - de fréquence d'occurrence (F) d'un événement non souhaité, souvent appelée, par abus de langage, probabilité ; - de gravité (G) de cet événement en terme d'ampleur des dommages causés à des cibles (également appelées « enjeux ») ; - d'acceptabilité (A) de cet événement par les individus qu'il concerne. $R \Rightarrow f(F; G; A)$

Terminologie utilisée en gestion des risques	
Risque acceptable	Le risque acceptable est le risque qui est toléré par la majorité d'une population ; il s'agit généralement d'un compromis entre risque encouru et coût.
Sciences du danger (Kevern, et al., 1991)	Discipline pluridisciplinaire dédiée à l'étude des risques et des accidents. Également appelée "Cindyniques".
Source de danger (Perilhon, 2003)	Caractéristiques d'une entité entraînant une augmentation du risque pour elle ou pour les autres entités en présence. Synonyme de facteur de risque.
Vulnérabilité	Fragilité des enjeux par rapport à l'occurrence d'un événement non souhaité.

TABLEAU 32 : TERMINOLOGIE UTILISÉE EN GESTION DES RISQUES

Terminologie utilisée en gestion du risque incendie dans les bâtiments	
Embrasement généralisé	Embrasement soudain de l'ensemble des combustibles exposés.
Établissement	Bâtiment à l'intérieur duquel sont exercées des activités mettant en relation des personnes.
Établissement recevant du public (ERP) (Code de la Construction et de l'Habitation - Art. 123-2)	« Constituent des établissements recevant du public tous bâtiments, locaux et enceintes dans lesquels des personnes sont admises, soit librement, soit moyennant une rétribution ou une participation quelconque, ou dans lesquels sont tenues des réunions ouvertes à tout venant ou sur invitation, payantes ou non. Sont considérées comme faisant partie du public toutes les personnes admises dans l'établissement à quelque titre que ce soit en plus du personnel »
Feu (Curtat, 2002)	Le « feu » désigne une combustion non contrôlée, dont les manifestations sous la forme de libération de chaleur et de production d'espèces chimiques est potentiellement dangereuse pour les personnes, et pour les objets, équipements, ouvrages, etc., (c'est à dire les biens), ou pour l'environnement.
Foyer (Curtat, 2002)	Un ensemble composé d'un objet combustible en feu surmonté d'un panache flottant.
Incendie (Curtat, 2002)	On parle d'incendie lorsque le feu concerne une surface étendue, que la chaleur est produite à un fort débit, et que l'extinction par les actions des pompiers est difficile.
Ingénierie de la Sécurité Incendie	Recours à des outils de simulation numérique exploitant les connaissances physiques dans le but de contribuer à une augmentation du niveau de sécurité des établissements.
Mesure de sécurité incendie	Mesure technique ou organisationnelle de prévention ou de protection ayant pour objectif la sécurité d'enjeux à protéger de l'incendie.
Réglementation performantielle	Une approche réglementaire de sélection ou de dimensionnement de mesures de sécurité fondée sur des outils de simulation numérique.
Réglementation prescriptive	Une approche réglementaire de sélection de mesures de sécurité fondée sur le respect de prescriptions codifiées dans des textes de lois et des décrets.
Rétroactivité	Notion de droit qui envisage qu'un acte juridique puisse avoir des effets sur des cas antérieurs à sa date de mise en application.
Stratégie de sécurité incendie	Un ensemble de mesures de mise en sécurité incendie en interactions.

TABEAU 33 : TERMINOLOGIE UTILISÉE EN GESTION DU RISQUE INCENDIE DANS LES BÂTIMENTS

Terminologie systémique et spécifique au langage ISI-Systema	
Activité	Un ensemble de processus.
Arbre d'interaction	Un outil de représentation de l'ensemble des séquences événementielles possibles d'une trame.
Boite	L'une des représentations graphique du langage. Sert à dessiner les entités remplissant les processus de création, de destruction ou de stockage.
Connexion	L'une des représentations graphique du langage. Correspond à un tuyau existant entre deux boites, ou entre une boite et l'environnement, que les éléments peuvent emprunter pour le transfert.
Degré de liberté	Nombre maximal de positions que peut prendre une vanne au cours d'un scénario.
Élément	Une quantité de masse, d'énergie et/ou d'information transformée dans le temps et dans l'espace. Dans une trame, il peut s'agir de masse gazeuse, d'énergie interne, d'un message d'alerte ou encore d'individus.
Émergence (Morin, 2005)	Capacité d'un système à voir émerger des propriétés nouvelles.
Empêchement de processus d'action	L'une des interactions entre les processus d'action proposée par le langage. Signifie que la réalisation d'un processus d'action inhibe la réalisation d'au moins un autre processus d'action.
Enchaînement de processus d'action	L'une des interactions entre processus d'action proposée par le langage. Signifie que la réalisation d'un processus d'action entraîne la réalisation d'au moins un autre processus d'action.
Entité	Unité structurelle la plus petite considérée.
Environnement	Tout ce qui n'est pas le système étudié.
Flèche	L'une des représentations graphiques du langage. Sert à dessiner les flux dans les connexions (et donc les processus de transfert).
Flux	Quantité de matière, d'énergie, ou d'information transformée (p. ex. : émise, dégradée ou échangée) par unité de temps dans un espace donné.
Interaction	Relation entre entités, systèmes, processus, etc. Elles peuvent être de nature mécanique, chimique, électrique.....informative, psychologique, sociale.... économique, financière...
ISI-Systema (langage)	Un langage fondé sur la systémique dont l'objectif est la définition et la représentation graphique d'une trame autrement que par un réseau de Petri.
ISI-Systema (méthode)	Une méthode fondée sur la systémique dont l'objectif est la construction de réseaux de Petri compatible avec SCHEMA-SI
Matrice d'interaction	Un outil d'identification des enchaînements et des empêchements entre les processus d'action (c'est-à-dire les événements) d'une trame. Outil proposé dans la méthode ISI-Systema.

Terminologie systémique et spécifique au langage ISI-Systema	
Modèle de processus d'action	L'une des représentations graphiques du langage. Sert à dessiner les processus d'action.
Processus (Le Moigne, 2006)	Une opération ayant pour effet de transformation dans le temps et dans l'espace une certaine quantité de matière, d'énergie et/ou d'information.
Processus d'action	L'un des processus élémentaires du langage. Correspond à la perturbation du transfert des éléments dans les connexions. Permet de définir indépendamment tous les événements de la trame.
Processus de création	L'un des processus élémentaires du langage. Correspond à la création d'éléments dans/par une entité.
Processus de destruction	L'un des processus élémentaires du langage. Correspond à la destruction d'éléments dans/par une entité.
Processus de stockage	L'un des processus élémentaires du langage. Correspond au stockage d'éléments dans une entité.
Processus élémentaire	Un processus élémentaire correspond à un type de transformation de matière, d'énergie et/ou d'information.
Processus de transfert	L'un des processus élémentaires du langage. Correspond au transfert d'éléments dans une connexion.
Signal de danger	Une entité disposant de la propriété intrinsèque de générer un message d'alerte.
Source de danger	Une entité disposant de la propriété intrinsèque de générer un flux de danger.
Structure	Un ensemble d'entités agencées dans l'espace.
Système	Un système est un ensemble d'objets organisés en fonction d'un but et immergé dans un environnement.
Systémique	La discipline visant à l'étude des systèmes reconnus comme étant trop complexes pour être appréhendés par des approches classiques.
Vanne	L'une des représentations graphique du langage. Correspond à un artifice conceptuel utilisé pour définir des processus d'action. Représente donc une possibilité offerte à n'importe quelle entité du système ou à l'environnement de modifier le débit de transfert.

TABEAU 34 : TERMINOLOGIE SYSTÉMIQUE ET SPÉCIFIQUE AU LANGAGE ISI-SYSTEMA

Terminologie relative aux réseaux de Petri	
Arcs	Flèches orientées qui relient certaines places à certaines transitions et vice versa.
Réseau de Petri prédictat-transition différentiel orienté objet (Villani, et al., 2007)	Un formalisme particulier de Réseaux de Petri permettant de faire intervenir des processus stochastiques et aussi un couplage entre les aspects continus et discrets (simulation hybride).
Transition	L'un des deux types de nœuds de la structure d'un réseau de Petri. Ce nœud symbolise les changements d'états du système (ou du sous-système) et se représente par un trait.
Place	L'autre des deux types de nœuds de la structure d'un réseau de Petri. Ce nœud symbolise les états du système (ou du sous-système) et se représente par un rond vide.
Simulations de Monte Carlo	Méthode de modélisation dont le principe repose sur la construction d'un modèle comprenant des paramètres aléatoires; puis sur la génération d'un grand nombre de scénarios dans lesquels la valeur des paramètres aléatoires change selon une loi de distribution de probabilité dans un intervalle.
Marquage	Répartition de l'ensemble des jetons présents dans les places d'un réseau de Petri, à un instant t.
Scénario	Un déroulement unique de l'action engendré par des successions de comportements spécifiques, et inscrit dans une trame, appelée ici scénario.
Structure	Un ensemble de place, de transition et d'arcs constituant un réseau de Petri élémentaire (RDPE).
Annotations	Un ensemble de variables, de conditions de sensibilisation, de fonctions de jonction et de fonctions continues constituant un RDPE.
Réseau de Petri	Un graphe orienté composé de deux types de nœuds : des <i>places</i> (qui symbolisent les états du système) et des <i>transitions</i> (qui symbolisent les changements d'état). Des <i>arcs</i> orientés relient certaines places à certaines transitions et vice versa. Des <i>jetons</i> marquent les places, définissant l'état du système. Cet état (et donc le marquage) évolue au cours du temps, par le <i>tir de transition(s)</i> .
Partie de réseau de Petri	Un morceau de réseau de Petri élémentaire représentant seulement l'une des fonctions remplies par l'objet représenté par ce réseau élémentaire.
Jeton	Un pointeur indiquant dans quel état le système (ou le sous-système) se trouve à l'instant t. Ce pointeur est représenté par un petit point noir, dans les places.
Réseau de Petri élémentaire	Un réseau de Petri représentant seulement un sous-ensemble du système étudié (c'est-à-dire un objet ou une entité). Abrégé RDPE.
Booléen (variable)	Un variable dont la valeur est soit "vraie" soit "fausse"

Terminologie relative aux réseaux de Petri	
Condition de sensibilisation	Une condition booléenne associée à chaque transition et utilisée pour en conditionner le tir.
Trame	Une description des lieux, des acteurs, des événements qui peuvent se dérouler, des interactions ainsi que des dénouements possibles.
Objet	Une entité informatique représentant un sous-ensemble du système étudié. Le sous-ensemble représenté est forcément une entité différente du volume gazeux.
Fonction continue	Une fonction mathématique associée à chaque place et utilisée pour modifier la valeur d'un ou de plusieurs variables de manière continue. Cette fonction peut appeler les routines de CIFI 2009.
Fonction de jonction	Une fonction mathématique associée à chaque transition et utilisée pour modifier la valeur d'un ou de plusieurs variables de manière discrète. Cette fonction peut appeler les routines de CIFI 2009.
Booléen (condition)	Une question posée à propos de la valeur d'une variable (booléenne ou non). La réponse à cette question est "oui" ou "non".
Transition passive	Une transition d'un RDPE amenée à fusionner avec une autre transition d'un autre RDPE. Une telle transition représente un changement d'état chez un objet qui est induit par un autre objet.
Transition active	Une transition d'un RDPE amenée à fusionner avec une autre transition d'un autre RDPE. Une telle transition représente une action d'un objet qui induit un changement d'état d'un autre objet.
Transition interne	Une transition d'un RDPE qui n'est pas amenée à fusionner avec une autre transition d'un autre RDPE. Une telle transition représente un changement d'état propre à l'objet étudié.
Variable publique	Une variable d'un RDPE dont la valeur est modifiée au cours d'un scénario et/ou dont la valeur initiale peut différer d'un scénario à l'autre. Dans tous les cas, cette valeur est potentiellement connue par n'importe quel objet.
Variable interne	Une variable d'un RDPE dont la valeur est modifiée au cours d'un scénario et/ou dont la valeur initiale peut différer d'un scénario à l'autre. Dans tous les cas, cette valeur n'est connue que par l'objet.
Constante publique	Une variable d'un RDPE dont la valeur ne change jamais quel que soit le scénario et dont la valeur est potentiellement connue par n'importe quel objet.
Constante interne	Une variable d'un RDPE dont la valeur ne change jamais quel que soit le scénario et dont la valeur n'est connue que par l'objet étudié.
Variable image	Une variable d'un RDPE utilisée pour enregistrer en temps réel la valeur d'une variable qu'il lit d'un autre objets ou parmi les variables connues dans l'ensemble de l'environnement SCHEMA-SI. Ces dernières variables sont listées au premier chapitre.

TABEAU 35 : TERMINOLOGIE RELATIVE À L'OUTIL SCHEMA-SI ET AUX RÉSEAUX DE PETRI