



Montréal, Québec
May 29 to June 1, 2013 / 29 mai au 1 juin 2013

Analyse de la défaillance fonctionnelle des composants non structuraux d'un système de protection incendie d'un hôpital sous l'effet d'un séisme

S.Youance¹, M.J. Nollet¹, G. McClure²

¹ Département du génie de la construction, École de technologie supérieure (ÉTS), Université du Québec

² Département de génie civil et de mécanique appliquée, Université McGill

Abstract: L'évacuation sécuritaire d'un hôpital pour cause d'incendie consécutif à un fort séisme est un enjeu primordial pour garantir la sécurité des occupants. Cet article analyse la performance sismique du système de protection incendie et la sécurité d'un circuit d'évacuation d'un hôpital de Montréal pour un séisme de fréquence et d'intensité spécifiques au site étudié tel que prescrit par le Code National du Bâtiment du Canada. L'analyse consiste en : 1) la collecte de données sur les composants fonctionnels et opérationnels (CFO) et la configuration du système, 2) l'évaluation de la vulnérabilité des CFO et la quantification du risque selon les critères de fonctionnalité de la norme « CAN/CSA S832-06 Réduction du risque sismique des CFO des bâtiments ». L'objectif de cette étude est d'évaluer les risques de défaillance opérationnelle des systèmes d'équipements critiques: composants mécaniques, électriques et de plomberie et certains éléments architecturaux et leur conséquence sur la sécurité du processus d'évacuation. La méthodologie des arbres de défaillance est utilisée pour conceptualiser la complexité des systèmes et particulièrement leurs interdépendances et interfaces. Dans cette analyse, les relations de cause à effet sont construites à partir de dommages observés dans les établissements hospitaliers lors de séismes survenus ailleurs dans le monde.

1 Introduction

Les incendies sont une conséquence courante des tremblements de terre et représentent un problème sérieux compte tenu du potentiel de propagation des foyers d'incendie et de la capacité limitée de réponse ou de l'insuffisance de ressources dans un environnement post-désastre. Toutefois, l'évaluation des risques associés est un domaine relativement récent; les conflagrations qui ont détruit les villes de San Francisco (1906) et de Tokyo (1923) suite à des séismes de magnitude M_w 7.9 sont les exemples les plus catastrophiques mais ont souvent été perçus d'abord comme des incendies, phénomènes courants avant la deuxième guerre mondiale, et non comme la conséquence d'un séisme (Scawthorn 2011). Par ailleurs, les normes actuelles visant la protection incendie ont été développées pour des conditions d'exposition normale au feu, c'est-à-dire sans tenir compte de dommages aux bâtiments résultant d'un séisme (Mousavi et al. 2008).

Plus récemment, lors des séismes de magnitude plus modérée tels Loma Prieta M_w 6.9 (1989), Northridge M_w 6.7 (1994), et Kobe M_w 6.9 (1995), des foyers d'incendie localisés ont été déclenchés. De nombreux bâtiments, particulièrement des centres hospitaliers ont dû être évacués pour garantir la sécurité de leurs occupants alors qu'ils ont subi peu de dommages structuraux. Les causes principales de ces évacuations sont multiples et on recense principalement : 1) l'incapacité à maîtriser les incendies à l'échelle locale due au manque d'eau et d'électricité et, 2) la défaillance des systèmes de protection incendie amenant entre autres des dégâts d'eau importants (Cousins et al. 2002; Mousavi et al. 2008; Scawthorn 2010). Par conséquent, l'atteinte de l'objectif de sécurité des occupants qui est primordial à la

fonctionnalité d'un hôpital, ne peut être réalisée qu'en considérant la performance d'éléments multiples et des systèmes en interaction. L'évaluation devra se faire selon différents scénarios de défaillance dans lesquels la fiabilité des composants fonctionnels et opérationnels (CFO) de manière générale est un paramètre majeur.

Au Canada, le Code National du bâtiment (CNB) définit les exigences de performance sismique pour les bâtiments et les hôpitaux. Ces derniers considérés à risque élevé vu leur importance doivent être conçus avec une demande sismique majorée par un facteur de 1,5 (IRC-CNRC 2010). En matière de fonctionnalité post-sismique, les exigences les plus récentes de l'édition 2010 du CNBC couvrent plusieurs catégories de CFO et sont définies en fonction de la sensibilité de ces derniers à l'accélération (ou la force) et/ou au déplacement. Toutefois, leur implémentation tarde à se concrétiser et par conséquent la fonctionnalité post-sismique de la plupart des bâtiments, même considérés « résistants aux séismes », n'est pas nécessairement assurée. Dans les régions de sismicité modérée, comme Montréal, cette situation est d'autant plus préoccupante que les séismes de conception sont associés à des accélérations de pointe au sol relativement élevées de l'ordre de 0,325g (pour un séisme de probabilité de dépassement de 2% en 50 ans pour un emplacement de catégorie C au site de l'hôpital sous étude) et on ne dispose pas de retour d'expérience de séismes significatifs et de données éprouvées sur les bâtiments et les CFO.

Cet article présente une méthodologie d'évaluation de la fonctionnalité post-sismique des hôpitaux reposant sur l'analyse de la défaillance fonctionnelle des CFO d'un système. Cette méthodologie est appliquée à un hôpital de Montréal, pour les différents systèmes dont la fonctionnalité garantit la sécurité des occupants. Les critères d'évaluation et d'analyse et les perspectives retenues pour quantifier les conséquences sur les systèmes sont également présentés. Cette évaluation, actuellement en cours de réalisation, représente la première tentative d'évaluer systématiquement la fonctionnalité post-sismique d'un hôpital de Montréal. Les arbres de défaillances, un outil couramment utilisé dans l'évaluation du risque, servent à modéliser les différents systèmes et initier l'évaluation de la chaîne de conséquences des dommages subis lors d'un tremblement de terre. Ce premier niveau d'analyse démontre que cette approche permet d'identifier les composants critiques des bâtiments.

2 Cadre d'évaluation de la fonctionnalité d'un hôpital : Application à la sécurité des occupants

2.1 Catégories d'objectifs de performance et de niveaux de performance

Les objectifs de performance des éléments structuraux et des CFO sont régis respectivement par le CNB et la norme « CAN/CSA S832-06 Réduction du risque sismique des CFO des bâtiments » (CAN/CSA 2006). La sécurité des occupants (SO) est considérée comme un objectif de performance minimal pour un établissement de soins de santé pour l'ensemble des composants et pour des séismes rares (10% en 50 ans) ou très rares (2% en 50 ans). Les hôpitaux, classés bâtiment de protection civile, doivent en plus garantir la continuité des opérations (IUC) et les dommages subis doivent être réduits au minimum pour des séismes occasionnels et la fonctionnalité complète pour un séisme fréquent.

L'atteinte de l'objectif de performance visant la sécurité des occupants (SO), est entre autres reliée au respect des exigences relatives à l'intégrité des composants architecturaux, au dégagement des corridors et issues de secours, et à la clarté et visibilité des signes et des cartes d'orientation au niveau des étages. L'objectif est de prévenir toute défaillance des CFO qui mettrait en danger la vie des usagers. La performance de SO attendue, tel que spécifiée dans la norme CAN/CSA S832-06 S832, doit garantir :

- le contrôle des mouvements des CFO qui peuvent causer directement des blessures graves, la fuite de matières dangereuses, des explosions, ou le déclenchement d'incendies,
- la fonctionnalité du système de protection incendie,
- le dégagement des voies d'entrée et d'issue.

2.2 Modélisation de la fonctionnalité d'un hôpital

La capacité d'un hôpital à assurer un niveau de performance visé, est assurée par la performance de ses composants individuellement et en interaction, tel qu'illustré au schéma de la Figure 1. L'hôpital y est décrit comme un système relativement complexe et interactif (symbolisé par des flèches) dont la fonctionnalité est déterminée par : 1) la vulnérabilité assignée à chacun des CFO, 2) la vulnérabilité du système structural et de ses composants résistant les forces gravitaires et les forces latérales (principalement dues au séisme dans le cas qui nous intéresse) et, 3) la vulnérabilité des services d'infrastructures essentielles tels les divers réseaux d'alimentation en eau, gaz, électricité, et de gestion des déchets. La vulnérabilité de ces composants est directement liée à l'aléa sismique et aux effets de site, données essentielles à l'évaluation de la fonctionnalité post-sismique. L'indisponibilité du personnel, en raison de décès ou de l'impossibilité d'accéder à l'hôpital lors du désastre, considérée comme une quatrième composante dans de nombreux travaux n'est pas prise en compte dans cette étude.

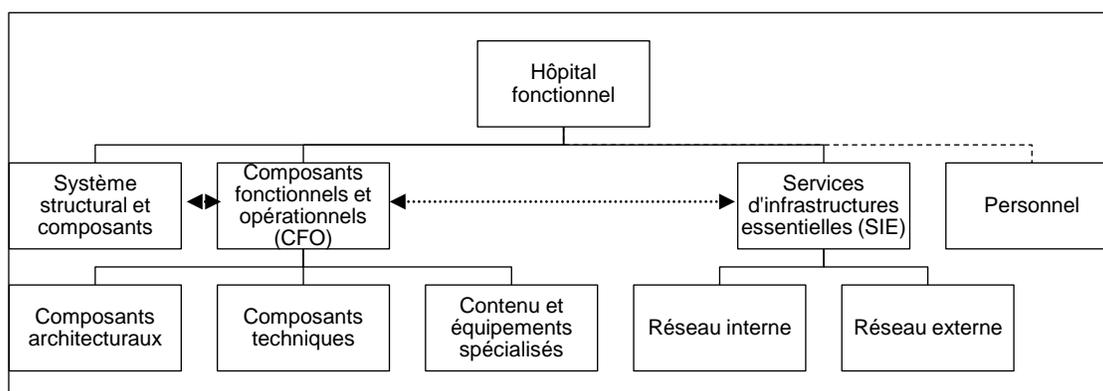


Figure 1: Composants fonctionnels d'un hôpital

Dès lors, les différents niveaux de performance attendus d'un hôpital ou d'un de ses sous-systèmes critiques peuvent être modélisés sous forme d'arbres de défaillance. Cette démarche déductive permet de reproduire de manière efficiente les interdépendances et la complexité des interfaces, les modes de défaillances et les pertes qui résultent de l'évènement critique (Haasl et al. 1981). Cela sous-entend toutefois que toutes les causes de défaillance sont connues. Dans une approche hiérarchisée de bas vers le haut, la relation entre un certain nombre d'entrées, ou évènements de base, et la sortie, ou évènement supérieur, est identifiée par un opérateur booléen (. ET. / . OU.). L'opérateur .ET. représente un système robuste (ou redondant) pour lequel une entrée va automatiquement suppléer à la défaillance d'au moins une autre entrée de la même rangée. Des modèles de sous-systèmes spécifiques à la sécurité des occupants sont illustrés aux sections 2.3 et 4.

2.3 Modélisation des systèmes reliés à la sécurité des occupants

Les recommandations principales des codes cités au paragraphe 2.1 (contrôle des CFO, protection incendie et évacuation) ont mené à la construction de l'arbre de défaillance de base décrivant la sécurité des occupants dans un hôpital (Voir Figure 2). Ce niveau de performance, évalué pour des séismes de 10% et 2% en 50 ans, dépend de l'opérationnalité des systèmes de protection incendie, de chauffage, ventilation et air climatisé (CVAC) et de la sécurité du processus d'évacuation des patients et du personnel. Compte tenu de la criticité d'hôpitaux spécialisés, l'opérationnalité des systèmes de maintien des fonctions vitales et les réseaux de distribution des gaz médicaux peuvent également constituer des enjeux reliés à ce niveau de performance mais ils ne sont pas inclus ici pour simplifier l'illustration de l'approche proposée.

Les entrées ou sous-systèmes (évènement intermédiaire : triangles GT1 à GT3) sont reliés à l'évènement de tête par un opérateur .OU. qui indique que la défaillance de l'un d'entre eux amène logiquement à l'impossibilité de garantir la sécurité des occupants (évènement redouté). Les évènements intermédiaires

seront par la suite développés en fonction des spécificités des études de cas et selon le même schéma arborescent pour arriver à des événements de base dont la défaillance est directement reliée aux secousses sismiques. Les dommages peuvent être d'ordre structural, par exemple l'effondrement des cages d'escaliers limitant l'évacuation du bâtiment, ou encore non structural en fonction de l'interaction entre l'ossature et les CFO (déplacement inter étage) mais aussi dû uniquement à la défaillance du CFO (insuffisance des attaches).

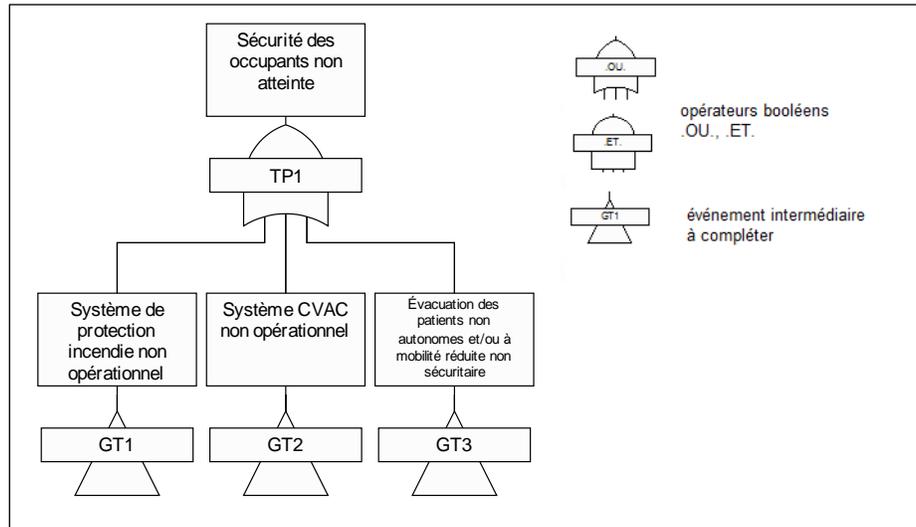


Figure 2: Arbre de défaillance pour un niveau de performance SO pour un hôpital

L'étendue de dommages des séismes récents, le niveau de fragilité des systèmes, la vulnérabilité des bâtiments et celle des CFO sont généralement bien documentés mais montrent une grande variation selon des paramètres locaux/régionaux spécifiques qui limitent l'utilisation de ces données dans un contexte différent. La tendance actuelle aux États-Unis et au Japon, est de développer des méthodes d'évaluation des risques pour des bâtiments prioritaires basées sur la vulnérabilité des systèmes et des CFO critiques (Porter 2002; Porter et al. 2006; Ray-Chaudhuri et Shinozuka 2010). Une méthodologie adaptée au contexte québécois est dès lors essentielle dans la prévention des risques pour les hôpitaux.

3 Méthodologie d'évaluation de la fonctionnalité post-sismique

L'objectif de cette étude est d'évaluer les risques de défaillance opérationnelle des sous-systèmes d'équipements critiques: composants mécaniques, électriques et tuyauteries et certains éléments architecturaux et structuraux et leur conséquence sur la fonctionnalité des systèmes. Un indice de fonctionnalité post sismique (IFP) est quantifié pour chacun des systèmes par une approche inductive. La méthodologie proposée consiste à attribuer à chaque composant (ou entrée de l'arbre de défaillance) un indice de priorité de risque (IPR) calculé comme le produit de deux paramètres selon le processus d'analyse des modes de défaillance, de leurs effets et de leur criticité (AMDEC) (MIL-STD-1629A, 1980) :

- L'indice de risque du composant, R, est déterminé suite à l'inspection visuelle selon la procédure décrite à la norme CAN/CSA S832-06. R est donné par le produit d'un indice de vulnérabilité V et d'un indice de conséquence C, soit :

$$[1] \quad R = V * C \quad \text{et} \quad V = (RB * RG * RE) / 10$$

Où le paramètre RB dépend de la période fondamentale du bâtiment et de la catégorie d'emplacement, RG est le facteur de sismicité locale calculé en fonction de l'accélération spectrale à 0,2s à l'emplacement et RE est fonction des caractéristiques de l'élément et de ses attaches à l'ossature.

- La probabilité relative de défaillance du CFO pour un séisme donné, définie par des courbes de fragilité. Un effort particulier est mis sur l'acquisition de données spécifiques au Québec, basées sur des simulations numériques, des données expérimentales ou l'expérience passée.

Cette méthodologie présente l'avantage de la simplicité. Un CFO avec un IPR plus élevé est immédiatement considéré comme plus critique. La norme CAN/CSA S832-06 prévoit des mesures d'atténuation à appliquer pour faire diminuer l'indice de risque R, toutefois une occurrence forte indiquera une apparition quasi certaine de la défaillance.

D'autres critères peuvent être également pris en compte (capacité à détecter la défaillance, par exemple) selon leur importance dans la criticité des effets. Des échelles différentes peuvent alors être définies sous forme de note pour chacun des critères afin d'établir une base égale de comparaison. À date, l'application de cette stratégie à l'évaluation de la fonction sécurité des occupants a mené à : (1) la collecte de données sur les composants fonctionnels et opérationnels (CFO) et la configuration du système, (2) l'évaluation de la vulnérabilité des CFO et la quantification du risque selon les critères de fonctionnalité de la norme CAN/CSA S832-06 ($R = V \cdot C$) et 3) le calcul préliminaire d'indices IFP_j des systèmes (j) selon les équations suivantes:

[2] Opérateur .ET. : $IFP_j = IPR_1 * IPR_2 * \dots * IPR_i$ avec i : nombre d'évènements en entrée

[3] Opérateur .OU. : $IFP_j = 1 - (1 - IPR_1) * (1 - IPR_2) * \dots * (1 - IPR_{i-1})$

4 Évaluation de la sécurité des occupants à l'hôpital Rivière-des-Prairies

4.1 Généralités

L'hôpital de Rivière-des-Prairies (HRDP) est une institution de soins spécialisés et sur-spécialisés dans les domaines de la pédopsychiatrie et des troubles envahissants du développement tout en étant une unité de recherche et d'enseignement affiliée à l'Université de Montréal. Cette structure peut être appelée, en cas de désastres, à suppléer à d'autres hôpitaux de l'île de Montréal.

Construit en 1947, l'établissement hospitalier est constitué d'un ensemble de neuf bâtiments de hauteurs différentes (1 à 5 étages), structurellement indépendants et répartis de manière symétrique (Voir Figure 3). Au centre, le bâtiment principal de cinq étages (aile A) regroupe, entre autres, les services administratifs, des cliniques externes, un gymnase, et un centre de la petite enfance. La partie ouest comporte essentiellement les résidences de patients et les services de soins continus et à l'est sont concentrées les activités de recherche et certaines cliniques spécialisées pour des soins de plus courte durée. Les services d'équipement et un garage logent dans les bâtiments du centre. Des espaces non utilisés sont temporairement fermés.

4.2 Caractéristiques locales du bâtiment principal

L'ossature du bâtiment principal est constituée de cadres en acier résistant au moment avec ductilité nominale, avec remplissage de maçonnerie de blocs non armée. Des mesures de vibrations ambiantes ont été réalisées afin d'identifier les propriétés dynamiques dominantes de ce bâtiment et la période fondamentale obtenue est de 0.34s. Les résultats des mesures seront utilisés pour la calibration de modèles pour des analyses structurales plus détaillées. Pour cette période, selon CAN/CSA S832-06, le paramètre RB est évalué à 1.2 pour un emplacement de catégorie C. Le facteur RG est calculé en fonction des paramètres de sismicité locale et vaut 0,51 pour un aléa de 2% en 50 ans.

4.3 Caractéristiques des CFO et équipements principaux reliés à la sécurité des occupants

D'importants travaux de réhabilitation touchant les CFO sont actuellement en cours au HRDP. Il faut citer notamment : 1) la mise à jour du système de protection incendie selon les normes des laboratoires des assureurs du Canada (ULC), 2) la révision du système électrique et 3) la mise en place d'un système de géothermie qui assure l'alimentation du système de chauffage, ventilation, air climatisé (CVAC).

L'ensemble des CFO lourds et équipements de gestion des incendies (échangeurs-refroidisseurs, pompes à incendie, panneau annonciateur, dispositifs d'alarme, station manuelle etc.) sont neufs et d'anciens systèmes/équipements comme la tour d'eau ont été désaffectés. Le bâtiment principal (aile A) représente le centre stratégique de gestion des opérations d'urgence avec les paramètres identifiés à la Figure 3 et est considéré comme le circuit prioritaire d'évacuation. Plus spécifiquement :

- l'ascenseur A-1 répond aux exigences des codes en termes de procédures d'intervention des pompiers et d'évacuation : alimentation d'urgence, fonctionnement en mode manuel uniquement et système de communication d'urgence;
- la valve à pression connectée à la pompe incendie est accessible aux pompiers;
- le chariot à codes contient l'ensemble de la documentation pour la gestion des urgences;
- le système de détection et d'alarme est de type adressable, c'est-à-dire que la localisation de zones distinctes et l'identification de défauts provenant de différentes sources se font à partir du panneau annonciateur du poste de contrôle.

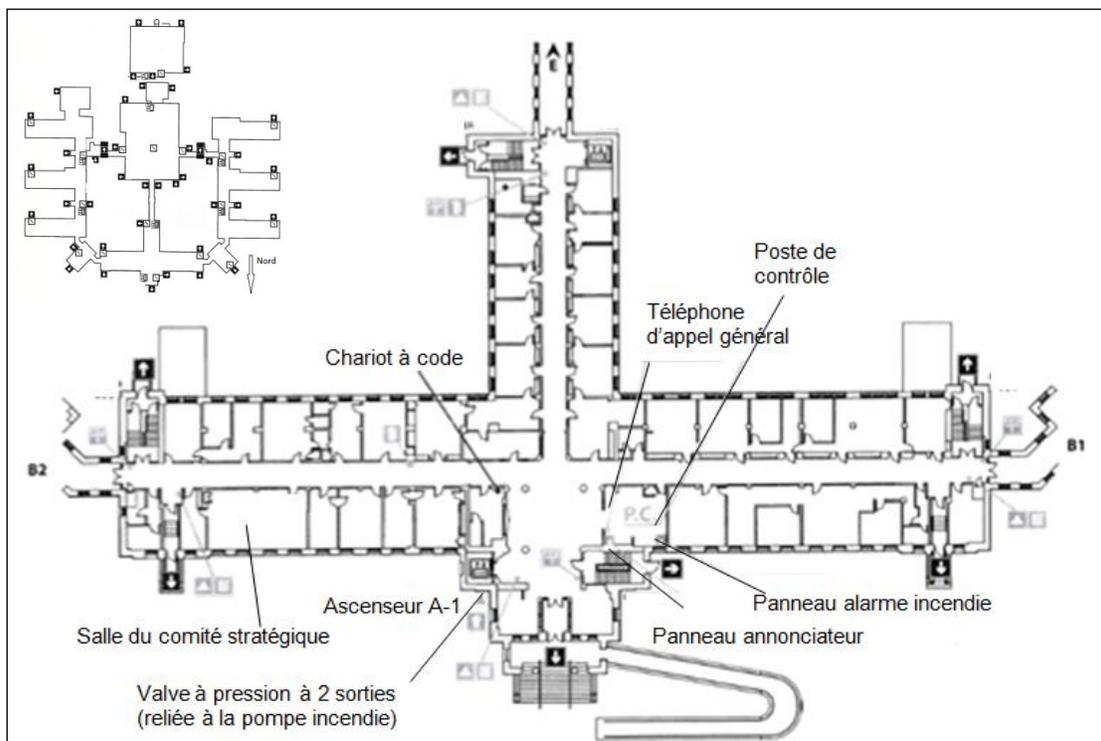


Figure 3: Bâtiment administratif et localisation des unités de gestion/équipements d'urgence

5 Identification des composants critiques / Conceptualisation des sous-systèmes

5.1 Arbres de défaillance

Les Figures 4 et 5 constituent l'arbre de défaillance pour le système de protection incendie. Le rôle de ce système est la détection et le contrôle de l'incendie et la propagation des fumées. Les informations proviennent d'une collecte de données sur les CFO in situ, la consultation de plans et de documents techniques et des rencontres avec les gestionnaires afin de préciser la configuration des systèmes.

Deux grands sous-systèmes non redondants sont considérés : le système de détection et d'alarme (GT1) et le système de réponse (GT2) (Voir Figure 4). Tous les événements de base (EV1 à EV13) représentent les CFO ou les interfaces avec les infrastructures de services essentiels critiques pour lesquels la norme CAN/CSA S832-06 définit les paramètres d'évaluation de leur vulnérabilité sismique et de conséquences.

Le système de détection incendie (GT1) joue un rôle crucial dans la rapidité de réponse donnée à l'interne et priorisée dans le cas de HRDP. La vulnérabilité de ce système dépend de plusieurs CFO dont la conception et la mise en place répondent à des exigences normatives. En plus de la défaillance liée à l'absence de dispositifs de retenue adéquats, ces CFO sont sujets à des dommages dus à l'impact ou la chute d'objets, les courts-circuits ou les dégâts d'eau. La fonctionnalité du système de protection incendie pose un grand défi compte tenu de l'interaction et les conflits entre le système CVAC et la sécurité de l'évacuation (GT1 à GT3 de la Figure 2). En effet, les systèmes servant à empêcher la propagation des fumées et incendies agissent souvent de concert avec les systèmes de ventilation. Par ailleurs la majorité des occupants du centre hospitalier ne peuvent évacuer par leur propre moyen, on suppose ici que le système passif en place : portes et séparations coupe-feu, colonnes et cloisons ignifuges, compartimentation des ailes, par exemple, procure un délai supplémentaire pour l'évacuation sécuritaire.

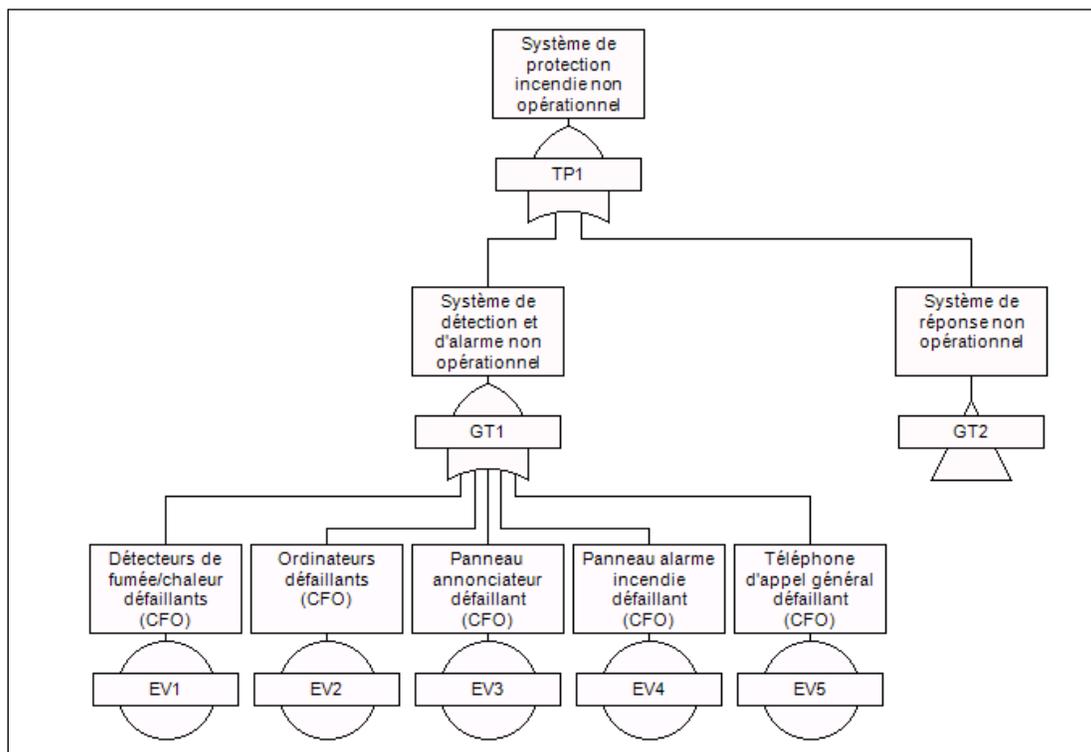


Figure 4: Branche Système de détection et d'alarme du Système de protection incendie

Le système de réponse (GT2) est principalement basé sur les gicleurs, lesquels sont vulnérables en raison des dommages possibles causés par les mouvements des faux-plafonds suspendus au droit des têtes de gicleur. La fonctionnalité des gicleurs dépend également de l'intégrité de la tuyauterie d'eau et de l'approvisionnement en eau (GT4). Ce sous-système est alimenté par deux lignes indépendantes du réseau d'aqueduc de la ville qui garantit une certaine redondance, mais hors de contrôle de l'interne. Les salles d'ordinateurs et de serveurs, sensibles à l'eau, sont munies d'un système de gicleurs dont l'agent extincteur est un liquide d'extinction de marque déposée. Ce système est relié à un panneau de gestion muni de cylindre mis sous pression d'azote ou d'air comprimé.

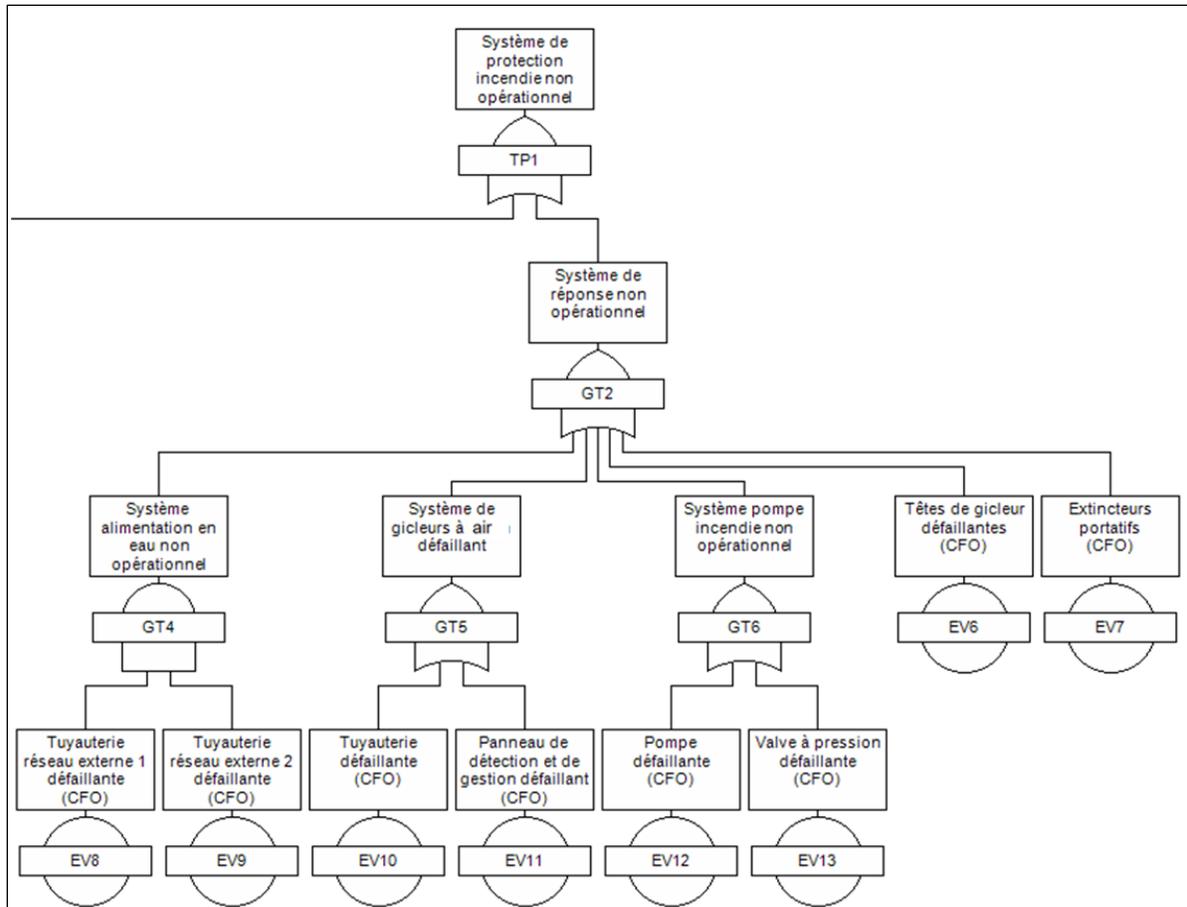


Figure 5: Branche Système de réponse du Système de protection incendie

5.2 Évaluation du risque

L'indice de risque sismique R a été calculé pour chacun des CFO critiques représentés aux Figures 4 et 5. Le Tableau 1 présente les résultats détaillés pour les CFO du système de réponse (GT2), pour un aléa sismique de 2% en 50 ans. L'indice de conséquences C est établi en considérant la menace à plusieurs personnes ainsi que l'importance prioritaire du bâtiment: il varie entre 15 et 20 selon le CFO. Selon CSA S832-06, un indice R inférieur à 16 indique un risque faible et l'application de mesures de mitigation est facultative, alors qu'une valeur supérieure à 50 indique un risque élevé et la mitigation obligatoire. Pour les CFO évalués, les indices indiquent un risque modéré à élevé.

Afin d'illustrer l'application de la stratégie d'évaluation de fonctionnalité post-sismique pour l'objectif de sécurité des occupants (2% en 50 ans), l'indice IFP est calculé pour les événements EV8 à EV13 (Figure 5). La probabilité d'occurrence de l'évènement EV10 est reliée à la vulnérabilité de la tuyauterie d'alimentation des gicleurs. L'indice de risque de la tuyauterie des gicleurs est établi à 64, soit un risque élevé (Tableau 1). La probabilité d'occurrence de l'évènement EV11 est reliée à la vulnérabilité du panneau de détection et de gestion des gicleurs à air, sensible à l'accélération. La vulnérabilité de ce CFO (EV11) vient principalement de son élancement (ratio hauteur/profondeur) puisque les conditions de retenue au plancher sont maximales et un dégagement adéquat est aménagé autour de l'élément. Son indice de risque sismique R est égal à 25,5, soit un risque modéré. Ces valeurs de R doivent ensuite être incluses dans la chaîne de conséquences menant à l'évènement GT5 en considérant la probabilité de EV10 et EV11 d'atteindre un niveau de dommages important (DS3) menant à une non fonctionnalité du système (Taghavi et Miranda, 2003).

Tableau 1: Risque sismique de CFO du système de réponse pour un aléa de 2% en 50 ans

Sous-systèmes	CFO critiques	V	C	R	Sensibilité	IPR _i	IFP _j
GT4	EV8 Tuyauterie réseau 1	3,2	20	64,0	D	0,6	0,4
	EV9 Tuyauterie réseau 2	3,2	20	64,0		0,6	
GT5	EV10 Tuyauterie gicleur	3,2	20	64,0	F	0,6	2,0
	EV11 Panneau de détection	1,7	15	25,5		3,8	
GT6	EV12 Pompe incendie	3,2	15	48,0	D	7,2	5,3
	EV13 Valve à pression	2,0	15	30,0		0,3	

* F: Force, D: Déplacement, N: Normatif, DR: Déplacements relatifs

À ce stade de l'étude, la probabilité de dommages est définie par les courbes de fragilité des CFO extraites de la méthodologie d'évaluation du risque Hazus (Tableaux 6.5c et 6.6c du manuel technique, FEMA 2003). Ces valeurs sont fonction du système de résistance aux forces latérales du bâtiment (cadre en acier résistant au moment avec remplissages), de la hauteur du bâtiment (entre 4 et 7 étages) et de sa classification (bâtiment de protection civile). Les courbes sont obtenues à partir des médianes et écarts-types et sont illustrées à la Figure 6 pour des CFO d'un bâtiment classé protection civile ayant les caractéristiques de l'hôpital HRDP. Malgré les nombreuses incertitudes liées à ce modèle, notamment des données conservatives pour des séismes de magnitude inférieure à M6, il permet d'estimer rapidement une probabilité de dommages (dénotée P[DS]) pour un CFO donné selon sa sensibilité à l'accélération ou aux déplacements relatifs pour un bâtiment donné.

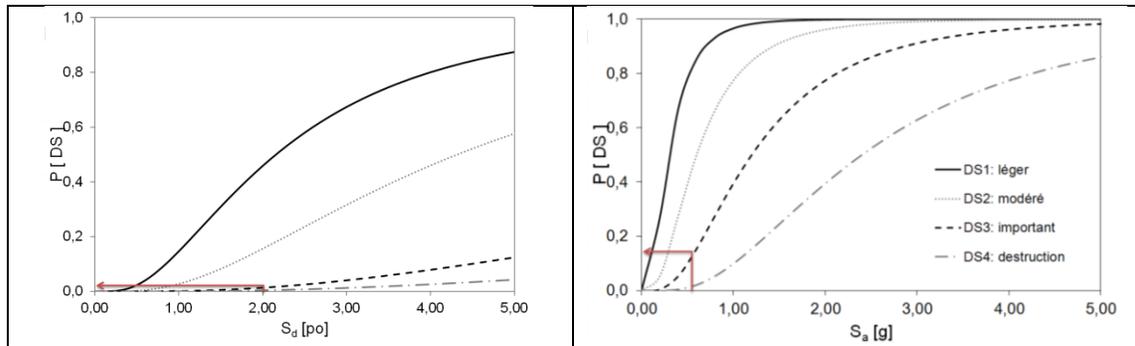


Figure 6: Courbes de fragilité de CFO d'un bâtiment classé protection civile : a) CFO sensible au déplacement; b) CFO sensible à l'accélération

Pour compléter l'illustration, considérons des valeurs fictives de déplacement spectral S_d de 2 pouces et d'accélération spectrale S_a de 0.6g au point de performance. Les probabilités de dommages de niveau DS3 sont respectivement de 1% et de 15%. Ces probabilités sont combinées aux valeurs des IPR selon les équations 2 ou 3, et les IFP résultants complètent le Tableau 1. Avec un IFP de 5,3 le sous-système de pompe est le plus critique lorsque comparé aux systèmes GT4 et GT5. La faible note du système GT4 vient également de sa robustesse. Une fois la base de donnée établies pour l'ensemble des systèmes, des échelles seront établies afin d'identifier le niveau de criticité des systèmes et de cibler les mesures d'atténuation. Lorsque la probabilité de dommage est faible et R élevé, ces mesures seront recommandées par le CAN/CSA S832-06, notamment l'installation de retenues adéquates pour limiter les mouvements de la tuyauterie et le renversement des CFO élancés.

6 Conclusion

À ce stade de l'étude, l'identification de l'ensemble des composants et des sous-systèmes fonctionnels a permis d'élaborer une méthode globale d'évaluation des niveaux de performance post-sismique. L'avantage principal de l'utilisation des arbres de défaillance est la possibilité d'analyser des sous-systèmes dont la configuration des arborescences est générique et peut donc être utilisée pour différents

établissements de soins. Les travaux futurs vont porter sur la mise en place d'une base de données complète sur les systèmes des hôpitaux, la modélisation sismique des structures et l'établissement d'indices de fonctionnalité sous l'effet de différents niveaux de risque sismique.

Remerciements

Les auteurs remercient le Conseil de Recherche en Sciences Naturelles et en Génie du Canada (CRSNG) pour le financement accordé dans le cadre du de projet de recherche stratégique STGP/396464, ainsi que la division des Services techniques de l'Hôpital Rivière-des-Prairies.

Références

- CAN/CSA. 2006. *Diminution des risques sismiques concernant les composants fonctionnels et opérationnels des bâtiments (CFO)*. S832-06. Mississauga: Association canadienne de normalisation, 108, viii p.
- Cousins, J., Heron, D., Mazzoni, S., Thomas G. et Lloyd D. 2002. *Estimating risks from fire following earthquake*. Institute of Geological & Nuclear Sciences Limited. Report 2002/60. Fire Service Commission. New Zealand.
- FEMA. 2003. *Multi-hazard Loss Estimation Methodology Earthquake Model Hazus-MH MR4 Technical manual*. Federal Emergency Management Agency. Washington D.C. 712p.
- Haasl, D.F., Roberts, N.H., Vesely, N.H. et Goldberg, F.F. 1981. *Fault tree handbook*. NUREG-0492. Washington, DC: US Nuclear Regulatory Commission. Office of Nuclear Regulatory Research, 211 p.
- IRC-CNRC. 2010. *Code national du bâtiment*. Institut de recherche en construction. Conseil national de recherches du Canada. Ottawa.
- MIL-STD-1629A. 1980. *Procedures for performing a failure mode, effects and criticality analysis*. U.S. Department of Defense, Washington D.C.
- Mousavi, S., Bagchi, A. et Kodur, V.K.R. 2008. Review of post-earthquake fire hazard to building structures. *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 35, n° 7, p. 689-698.
- Porter, K. 2002. Learning from earthquakes: A survey of surveys. *An Action Plan to Develop Earthquake Damage and Loss Data Protocols*. EERI, Pasadena, California, September 19-20 2002.
- Porter, K., Krishnan, S. et Xu, X. 2006. *Analysis of Simultaneous Operational Failure of Critical Facilities due to Earthquake, for a California Utility*. EERL 2006-01. Pasadena, California: California Institute of Technology, 99 p.
- Ray-Chaudhuri, S., et Shinozuka, M. 2010. Enhancement of seismic sustainability of critical facilities through system analysis. *Probabilistic Engineering Mechanics*, vol. 25, n° 2, p. 235-244.
- Scawthorn, C. 2010. *Analysis of Fire Following Earthquake Potential for San Francisco, California*. SPA Risk LLC, for the Applied Technology Council on behalf of the Department of Building Inspection, City and County of San Francisco, 54 p.
- Scawthorn, C. 2011. *Water supply in regard to Fire Following Earthquake*. PEER Report 2011/08. Pacific Earthquake Engineering Research Center, Seismic Safety Commission - Berkeley, 124 p.
- Taghavi, S. et Miranda, E. 2003. *Response Assessment of Nonstructural Building Elements*. PEER Report 2003/05. Pacific Earthquake Engineering Research Center, Seismic Safety Commission - Berkeley, 84 p.