

ANALYSE OPERATIONNELLE : ETUDE DE LA PHASE DE REPONSE DU PLAN DE GESTION DE CRISES

Préambule

Dans cette partie d'analyse opérationnelle du plan de gestion de crise, nous nous focalisons sur la phase de réponse du plan blanc de l'HAD. La phase de réponse à la crise commence dès l'apparition d'un élément déclencheur. Ce dernier peut être une alerte, une information confirmative dans le cas des catastrophes naturelles, ou la survenue même de la crise dans le cas des crises d'origine humaine de type attaque terroriste ou intoxication malveillante, etc.

Dans le contexte de l'HAD dès la réception de l'information de la part des patients, de l'agence régionale de santé ou de la direction territoriale, le processus d'activation de la cellule de crise (voir processus sur le lien suivant : <http://www.prhodom.disp-lab.fr/ProcessusPlanBlanc.pdf>) est déclenché.

Le but de cette partie est de développer des outils d'aide à la décision pour soutenir la cellule de crise en temps d'urgence. Aujourd'hui notre partenaire ne dispose pas de ce genre d'outils. N'ayant pas vécu de crise de grande ampleur, les membres de la cellule de crise seront obligés d'improviser pour prendre les solutions leur semblant les meilleures. L'objectif est donc de minimiser cette marge d'improvisation qui est toujours une source d'erreurs et de risques surtout lorsqu'il s'agit de secourir des vies humaines.

Dans ce qui suit une revue de littérature sur les travaux qui ont été menés en rapport avec notre problématique, est discutée.

3.1. Etat de l'art

Notre recherche bibliographique porte principalement sur la réponse de la chaîne logistique de l'HAD face à une crise sanitaire d'origine naturelle et/ou d'origine humaine. Comme nous l'avons signalé précédemment, les travaux portant sur la gestion des urgences en HAD sont très rares.

D'un point de vue plus global, la réponse à la crise en HAD implique des activités et des opérations de logistique humanitaire de type, évacuation, localisation, gestion de stock, etc. Nous avons donc étendu notre recherche aux modèles de réponse étudiés dans le cadre de la logistique humanitaire.

Nous étudions principalement les articles publiés entre 2007 et 2017. Mais un bon nombre de travaux intéressants qui ont été publiés avant 2007 sont également étudiés. Nous attribuons une attention particulière aux modèles d'optimisation et de simulation. Nous avons utilisé les bases de données suivantes : Web of science, Science Direct, Springer, Taylor & Francis.

Pareillement à la première partie de bibliographie concernant l'analyse stratégique, nous avons défini deux familles de mots clés. La recherche a été faite sur la base des croisements entre ces deux familles de mots clés.

- Famille 1' : emergency, catastrophe, natural disaster, man-made disaster,
- Famille 2' : humanitarian logistics, humanitarian relief, crisis management, logistics response,

Quelle que soit l'origine de la crise, il y a un certain nombre de décisions majeures à prendre et un nombre d'opérations à mettre en œuvre : évacuation de la population dans les zones en danger, distribution des secours, localisation des lieux de rassemblements (les abris), allocation de ressources, gestion de stocks, etc.

Dans ce cadre, Caunhye, Nie et Pokharel (2012) a effectué un état de l'art sur les modèles d'optimisation utilisés dans la logistique de réponse aux situations d'urgence.

Chen et al. (2014) a proposé une classification à trois niveaux des travaux portant sur la logistique humanitaire :

- Niveau 1 : orientation logistique (localisation, évacuation etc.),
- Niveau 2 : type de la catastrophe (naturel, humaine, intégrée),
- Niveau 3 : méthodes et approches utilisées dans la résolution du problème.

Dans notre contexte, nous allons étudier les articles portant sur la logistique humanitaire mais en lien avec les activités qui peuvent être déployées par l'HAD pour répondre à une crise quelconque.

Nous avons identifié les sous-problèmes suivants :

- La localisation des lieux de rassemblements (les abris),
- L'évacuation de la population en danger vers les lieux de rassemblement,
- Distribution des secours à la population évacuée et à celle maintenue à domicile,
- La gestion des stocks des produits à livrer et des médicaments à administrer.

3.1.1. La localisation des lieux de rassemblements (abris)

La localisation concerne la construction de nouvelles infrastructures dans la phase de préparation à la crise, et le choix d'ouverture des sites déjà construits dans la phase de réponse. La plupart des travaux portant sur la localisation utilisent la programmation mixte en nombres entiers (Caunhye et al., 2012).

La majorité des travaux traitent des problèmes mono-période du moment que la plupart des travaux de localisation sont dédiés à la phase de préparation stratégique.

Le problème de localisation dans la phase de réponse consiste principalement à choisir le ou les meilleurs sites parmi une liste de candidats potentiels selon les critères prédéfinis (coût de fonctionnement, coût d'ouverture, durée de transport, etc.).

Le problème de localisation généralisé est, dans la plupart des cas, modélisé comme un problème de couverture maximale (maximal covering problem). Ainsi on maximise le nombre de personnes à affecter aux sites ouverts. Plusieurs auteurs ont utilisé cette modélisation dont (Alsalloum et Rand, 2006; Dessouky et al., 2009; Doerner et al., 2005; Jia et Dessouky, 2007a, 2007b ; Murali, Ordóñez, et Dessouky, 2012; Tricoire, Graf, et Gutjahr, 2012).

Li et al. (2012) ont développé un modèle de programmation à deux niveaux pour optimiser le choix des emplacements des lieux de rassemblement sous différentes conditions basées sur différents scénarios d'ouragans. Goerigk, Grün et Heßler (2014) ont combiné la localisation des points de collecte et les lieux de rassemblement avec le besoin d'ordonnancement et ont développé une heuristique pour résoudre le problème.

D'autres auteurs se sont focalisés sur le problème de localisation mais en phase de préparation pour choisir les emplacements des sites à ouvrir en temps de crise, et ont utilisé la méthode du p-médian (Xi et al., 2013) et la méthode du p-centre (Huang, Kim et Menezes, 2010).

Certains auteurs ont combiné le modèle de couverture maximale avec la théorie de la File d'Attente (Galvão, Chiyoshi et Morabito 2005; McLay, 2009; Takeda, Widmer, et Morabito, 2007). Notons que la simulation a été également utilisée pour étudier les scénarios d'afflux sur les sites à ouvrir (Whitworth, 2006).

3.1.2. L'évacuation des personnes en danger vers les lieux de rassemblements

La littérature traitant des problèmes d'évacuation est assez riche. Beaucoup d'intérêt a été attribué à l'évacuation des bâtiments suite à une catastrophe telle qu'un incendie.

Pelechano et Malkawi (2008) ont passé en revue les modèles de simulation traitant de l'évacuation des bâtiments en cas d'incendies. La simulation a été utilisée en particulier dans les études d'évacuation microscopiques qui capturent les détails du comportement des évacués en temps de catastrophe (Kaup et al., 2002). Wu et al. (2007) ont intégré un système d'information géographique (SIG) dans un modèle de simulation à événement discret en utilisant le logiciel Arena pour simuler le processus d'évacuation et dimensionner les ressources à mobiliser. Chen, Guinet et Ruiz (2014) ont étudié le scénario d'évacuation d'un hôpital suite à une alerte de crue en combinant un modèle d'optimisation pour le dimensionnement de ressources humaines et matérielles avec un modèle de simulation pour simuler les flux d'évacuation.

En ce qui concerne les études d'évacuation macroscopique qui portent sur l'évacuation des zones en danger. Les auteurs recourent à l'optimisation basée sur des outils de recherche

opérationnelle. Dans ce genre d'études, on néglige certains détails du problème tels que le comportement de l'évacué. Sayyady et Eksioglu (2010) ont proposé un modèle linéaire mixte et une méthode de recherche Tabou pour gérer l'évacuation des zones menacées en utilisant le système des transports en commun.

Récemment, une nouvelle variante du problème d'optimisation des tournées de véhicules (Vehicle routing problem VRP), appelée BEP (Bus Evacuation Problem), qui consiste à transporter des évacués d'un ensemble de points de collecte vers un ensemble de points de rassemblement prédéfinis appelés abris, en utilisant des bus avec des capacités limitées, a suscité l'intérêt des chercheurs. Le BEP a été clairement étudié d'abord par Bish (2011), où il a modélisé le BEP et a proposé deux heuristiques efficaces pour résoudre le problème. Goerigk, Grün et Heßler (2013) ont développé des heuristiques différentes pour trouver les limites inférieures et supérieures du problème et les ont implémentées dans un cadre intégré. Goerigk et Grün (2014) ont formulé une version linéaire mixte et robuste du BEP, où le nombre exact de véhicules n'est pas connu à l'avance.

Kongsomsaksakul, Yang, et Chen (2005) ont développé un programme à deux niveaux pour modéliser l'évacuation à la suite de la prévision d'une crue. Le premier niveau est dédié à la recherche d'un ensemble de points de collecte optimaux pour rassembler les évacués, tandis que le second trouve le meilleur choix d'itinéraires. Tzeng, Cheng et Huang (2007) ont proposé un modèle multi-objectif basé sur la théorie des Ensembles Flous et visant à minimiser à la fois le coût et le temps de déplacement, mais aussi à maximiser le niveau de satisfaction. Yi et Özdamar (2007) ont proposé une formulation du problème qui vise à coordonner la logistique du support et la dynamique d'évacuation avec un souci d'équilibre entre les différents services. Tayfur et Taaffe (2009) ont proposé un modèle de programmation entière pour dimensionner les ressources impliquées dans les activités d'évacuation dans un horizon temporel prédéfini. Song, He et Zhang (2009) ont combiné la localisation avec le problème de routage sous l'incertitude de la demande pour trouver le meilleur itinéraire d'évacuation. Bish (2011) ont utilisé une formulation linéaire mixte pour classer les différents types de personnes à évacuer.

3.1.3. Distribution des secours (relief distribution)

La distribution de secours concerne l'affectation des secours et le choix des modes de distribution. Campbell, Vandebussche et Hermann (2008) ont modélisé la distribution des secours en tant que problème de tournées de véhicule dans le but de minimiser le temps de livraison. Clark et Culkin (2013), Doerner et al. (2005), Naji-Azimi et al. (2012) et Nolz et al. (2010) ont proposé une formulation basée sur le problème de tournée de couverture (Covering tour problem) pour modéliser ce problème. Ekici, Keskinocak et Swann (2008) ont développé un modèle mathématique pour estimer les besoins alimentaires et ont proposé un modèle de réseau de distribution alimentaire.

Lee et al. (2006), Ryttilä et Spens (2006) et Ke and Zhao (2008) ont utilisé la simulation pour prendre en compte l'incertitude et traiter des scénarios réels. Hu and Zhao (2011) et Wang, Wang et Zeng (2009) ont utilisé des équations différentielles pour la modélisation de l'incertitude pour l'estimation de la demande. Jamrog, Shatz et Smith (2007) ont utilisé des chaînes de Markov pour modéliser l'évolution de la maladie de l'anthrax. Chen, Guinet et Ruiz (2016) ont proposé un modèle linéaire pour la réponse à une attaque terroriste biologique avec l'anthrax. L'étude a été faite pour un scénario d'étude sur une demande des Hospices Civils de Lyon.

La théorie des Ensembles Flous a été également utilisée pour mitiger l'effet des incertitudes pour prioriser les zones affectées par la crise. Sheu (2007) a utilisé la méthode de clustering basée sur les Ensembles Flous pour regrouper les zones affectées et leurs assigner des degrés de priorités. Tzeng Cheng et Huang (2007) a proposé un modèle d'optimisation floue visant à minimiser le coût de transport et maximiser le niveau de satisfaction.

3.1.4. Gestion de stocks

En logistique humanitaire, après avoir évacué la population il faut bien lui assurer les secours nécessaires en termes de soins, de médicaments, de nourriture, etc. Subséquemment, la gestion de stock de ces produits est concernée.

Ozguven et Ozbay (2013) et Taskin et Lodree (2010) ont proposé des modèles d'optimisation avec l'objectif de minimiser le coût total. Ozbay et Ozguven (2007) a développé un modèle de gestion de stock stochastique qui détermine les quantités optimales de réapprovisionnement. Ils étudient des scénarios d'intervention d'urgences à long terme. Wein, Craft, et Kaplan (2003) ont formulé une série d'équations différentielles pour le dimensionnement des stocks nécessaires des antibiotiques pour répondre à une attaque bioterroriste.

En temps de réponse à la crise, la collaboration entre plusieurs entrepôts est nécessaire pour l'échange des produits (médicaments par exemple) et afin de rendre la disponibilité de ces derniers immédiate en temps voulu. Dans ce cadre la Théorie des Jeux a été utilisée pour mettre en œuvre cette mutualisation des entrepôts avec la prise en compte de plusieurs facteurs dont l'accord d'aide mutuelle entre les différentes parties prenantes (Adida, DeLaurentis et Lawley, 2011; Delaurentis, Adida et Lawley, 2008; DeLaurentis, Adida et Lawley, 2009).

3.1.5. Discussion

Au vu des travaux présentés, on peut affirmer que la logistique humanitaire est d'une importance indéniable qui a suscité l'intérêt des chercheurs dans de nombreuses disciplines. En termes de modélisation, il s'agit d'un contexte qui fait appel à plusieurs sous problèmes, à savoir la localisation, l'évacuation, la gestion de stocks, etc. Les travaux sont nombreux et nous avons sélectionné ceux que nous avons jugés les plus pertinents en rapport avec notre thématique de recherche.

En termes de méthodes et approches utilisées, la programmation mathématique a été la plus utilisée. D'autres méthodes ont été marginalement utilisées, à savoir la Simulation, la Théorie des Jeux, et les réseaux de File d'Attente.

La majorité absolue des travaux traitent des problèmes mono-période alors qu'il serait bien commode de prendre en compte l'aspect temporel dans la gestion de crise. La plus part des crises ont un impact important dans la durée, telle que les crues, les intoxications biologiques, etc.

Notons aussi que la majorité des travaux présentés n'ont pas été fondés sur des cas réels ou des scénarios réalistes capturant les détails de la vie réelle.

Les problématiques ont été étudiées séparément, sauf pour quelques cas de combinaison telle que localisation-allocation et localisation-évacuation. Il serait mieux de prendre en compte les problématiques concernées dans un cadre intégré. Les décisions portant sur l'un des problèmes peuvent influencer sur un autre surtout dans un contexte dynamique et multi-période.

Il faut signaler qu'aucun des travaux cités ci-dessus n'a traité clairement la réponse à une crise dans le contexte d'HAD. L'HAD présente un certain nombre de particularité qu'il faut prendre en compte lors de notre étude, à savoir :

- L'HAD est une structure avec une logistique particulière. Prenons le cas de l'évacuation, les patients ne peuvent pas se déplacer du moment que ce sont, en général, des personnes âgées et non autonomes dispersées.
- L'HAD fait appel à plusieurs types de ressources humaines (médecins, infirmiers, livreurs, etc.) qui travaillent dans un cadre réglementaire très stricte.
- L'HAD fait partie d'un système de santé national, et en temps de crise une coordination inter-établissement des moyens doit se faire au mieux.

Pour remédier à ces gaps identifiés nous proposons une étude par scénarios basés sur des cas réels dédiés à la gestion des urgences en HAD et en collaboration avec notre partenaire dans le projet PrHoDom, l'HAD Soins et Santé.

Nous proposons donc :

- Un modèle de réponse à une crise d'origine humaine de type intoxication criminelle avec la toxine botulique dans les réseaux de distribution collective des repas à domicile. Le modèle intègre l'évolution de la maladie et de l'état du patient, à l'aide d'une version étendue du modèle compartimental SIR (Susceptible - Infected – Removed), avec un modèle d'affectation et de dimensionnement de ressources humaines et matérielles. Nous étudions le problème dans un contexte multi-période de collaboration entre une HAD et un hôpital conventionnel dans le cadre d'un plan blanc élargi.
- Un modèle de réponse à une crise d'origine naturelle de type crue qui s'étend dans le temps. Le modèle proposé prend en compte les particularités de l'HAD et de ses patients. Nous prenons en compte l'aspect d'évolution de la crise dans le temps. Notre modèle combine un modèle de partitionnement (Set Partitioning Problem) avec un problème d'évacuation, de localisation-allocation et d'affectation avec la prise en compte de coûts fixes et des coûts variables dans un contexte multi-période.

3.2. Un plan de gestion des urgences pour faire face à une attaque criminelle d'origine alimentaire

Introduction

Dans cette section nous allons étudier la problématique d'accès aux soins causée par une menace d'origine humaine, à savoir l'intoxication. L'intoxication alimentaire est fréquente dans la restauration collective. Les infections peuvent survenir avec les matières premières utilisées, du processus de préparation des aliments, des moyens de transport et de conservation utilisés, etc. Dans cette section, nous étudions le scénario d'une intoxication alimentaire malveillante impliquant des patients de l'HAD. Les patients pris en charge en HAD sont principalement des personnes handicapées et / ou âgées. Étant non autonomes, ils commandent des repas aux traiteurs. Un employé criminel d'un traiteur pourrait infecter les aliments qui empoisonnent une partie des patients de l'HAD mais aussi des personnes valides. Pour faire face à cette menace, la structure d'HAD a prévu de collaborer avec les hôpitaux conventionnels pour mieux soigner les personnes pendant les phases aiguës et de rétablissement de l'infection, dans le cadre d'un plan blanc élargi (voir chapitre 1 pour plus de détails sur le plan blanc élargi). Rappelons que la collaboration bilatérale entre les HADs et les hôpitaux conventionnels a été identifiée comme une contremesure stratégique et une piste d'amélioration de la proactivité dans la section 2.3.

Un modèle de programmation linéaire est donc proposé pour simuler le scénario étudié et évaluer ses conséquences. Il modélise l'infection d'origine alimentaire et la réponse médicale dans le cadre d'une collaboration HAD-Hôpital, c.-à-d., un plan blanc élargi.

Les travaux présentés dans cette section vont être présentés à la conférence ILS 2018.

3.2.1. Contexte

Sur l'ensemble des menaces prises en compte par le plan blanc des HAD, nous avons identifié trois problématiques majeures, telles que l'accessibilité difficile aux domiciles, l'impossibilité de maintien des soins de qualité, et l'afflux massif des patients. Le scénario étudié dans ce chapitre consiste à répondre à un risque biologique. Il peut être d'origine accidentelle ou malveillante. Ce travail concerne la contamination délibérée de la chaîne d'approvisionnement alimentaire. Il fait partie des études de défense alimentaire (Bogadi, Banović, et Babić 2016; Maillot 2010; Manning et Soon, 2016). La défense alimentaire peut être définie comme le processus visant à assurer la sécurité des aliments et des boissons, et de leur chaîne d'approvisionnement contre les attaques malveillantes cherchant à nuire ou gagner frauduleusement de l'argent (Manning et Soon 2016). Les premières études sont apparues après les attentats du 11 septembre (Sheffi 2001; Sobel, Khan, et Swerdlow, 2002). La défense alimentaire est axée sur la protection de la chaîne d'approvisionnement alimentaire physique. Elle diffère des autres études sur la salubrité des aliments où la contamination des aliments est involontaire. Dans notre cas, la contamination des aliments est intentionnelle, c'est-à-dire criminelle. De telles attaques criminelles peuvent avoir lieu dans des fermes, des usines de transformation des aliments, des chaînes de distribution, des magasins de détail ou des restaurants (Khan, Swerdlow, et Juranek, 2001). Les stades préalables (fermes) et de post-

production (magasins ou restaurants) sont plus vulnérables en raison de l'accès peu protégé à la nourriture (Manning et Soon, 2016). Les usines de transformation peuvent être l'étape la plus critique en raison de la grande dispersion postérieure des produits aux clients (Sobel et al. 2002). Les attaques sont anonymes pendant la période de contamination afin d'empoisonner délibérément un plus grand nombre de consommateurs. Les criminels pourraient être des employés licenciés, des concurrents malveillants, des terroristes, etc. (Bogadi et al., 2016; Manning et Soon, 2016). Des études plus générales sur la défense de la chaîne d'approvisionnement peuvent être trouvées dans (Sheffi, 2001) qui a spécifié certaines contre-mesures générales concernant le choix du fournisseur, l'emplacement de l'usine, la gestion des stocks, la standardisation des processus, etc.

La plupart des intoxications alimentaires se produisent dans la restauration collective. Ce secteur de l'industrie a d'importants problèmes de gestion des ressources humaines en raison des conditions de travail: heures de travail, cadences de travail, jours de repos, etc. (Forté et Monchatre, 2013). La restauration qui comprend la production et la livraison de repas représente un secteur vulnérable où une intoxication alimentaire accidentelle ou malveillante est très probable. Afin d'étudier le pire des scénarios générant les conséquences les plus néfastes dans le temps, nous émettons l'hypothèse d'une attaque criminelle qui est plus longue à détecter et qui peut contaminer plusieurs aliments différents.

Nous étudions le scénario d'une intoxication alimentaire malveillante des patients d'une structure de l'HAD, dont le contexte est comme suit. Les patients pris en charge en HAD commandent les repas à un traiteur recommandé par la structure d'HAD. Un employé criminel du traiteur qui infecte les aliments qui empoisonnent une partie des patients de l'HAD et certaines personnes valides en dehors de l'HAD. Une épidémie d'origine alimentaire est initiée. Pour faire face à cette menace, la structure de l'HAD a déjà prévu de collaborer avec les hôpitaux conventionnels pour mieux soigner les personnes pendant les phases aiguës et de rétablissement de l'infection, dans le cadre d'un plan blanc élargi.

3.2.2. L'agent biologique

En tant que choix d'agent biologique pour notre scénario d'attaque alimentaire, la bactérie botulique A a été sélectionnée pour les raisons suivantes:

- Les spores de la bactérie botulique sont thermorésistantes, elle est largement présente dans la nature (sol, rivière, mer). Elle produit des toxines en l'absence d'oxygène. Il existe 7 formes différentes de toxine botulique.
- La toxine botulique A est la plus létale pour l'homme. L'intoxication peut être causée par une infection intestinale, des plaies ou des inhalations.
- La bactérie botulique n'est pas transmissible d'une personne à une autre.
- L'immunogénicité des toxines botuliques n'a été étudiée que pour le Botox (toxines botuliniques A utilisées pour traiter les spasmes sévères dans les muscles du cou et la spasticité post-AVC). Le taux d'immunogénicité est égal à 15% (Naumann et al., 2013).
- La toxine botulique A bloque la transmission neuronale dans les muscles et progresse du cou, aux bras et aux poumons (Balali-Mood, Moshiri et Etemad, 2013). Elle est inodore, incolore et sans goût. En l'absence de ressources médicales, le taux de mortalité peut atteindre 78% (Smith, Roxas-Duncan et Smith 2010).

Une antitoxine existe mais elle doit être administrée dès que les signes neurologiques du botulisme apparaissent, soit environ entre 24 heures et 72 heures après l'exposition (Arnon et

al., 2001). L'administration d'antitoxine nécessite une hospitalisation de 7 jours (Leclair et al., 2013), ce qui peut être fait dans une HAD. Au-delà de 72 heures l'antitoxine n'est plus efficace, le traitement de la toxine botulique consiste principalement en des soins de soutien nécessitant des ventilateurs mécaniques et une alimentation par sonde entérale ou parentérale, plus précisément une hospitalisation de 14 jours dans une unité de soins intensifs et 14 jours de soins à domicile (Leclair et al., 2013; Souayah et al., 2012). Les soins intensifs peuvent être retardés si les patients sont emmenés en unité d'urgence, mais le taux de mortalité des patients retardés (plus d'une demi-journée) est égal à 36% en raison d'infections respiratoires (Hung et al., 2014).

3.2.3. Etude du scénario

3.2.3.1. Présentation du scénario

Un traiteur prépare et transporte des repas pour un groupe d'habitants de la métropole lyonnaise. Une partie importante de ses clients est composée de patients de l'HAD Soins est Santé (25%). Les repas sont livrés aux patients une ou plusieurs fois par semaine. La restauration est un domaine d'activité où le taux de rotation du personnel (158%) (Forté et Monchatre, 2013) est très élevé. En France, les maladies d'origine alimentaire dans la restauration collective (55%) sont élevées (Delmas et al., 2010).

Un employé récemment recruté répand la toxine botulique dans les desserts lactés (Wein et Liu, 2005). Beaucoup de clients sont contaminés, qui peuvent appartenir à la structure d'HAD. Une antitoxine existe, elle doit être administrée dès l'apparition des symptômes et entre 12h et 72h après l'ingestion. Au-delà de cette période, la personne infectée doit être prise en charge dans une unité de soins intensifs sans tarder pour pallier les défaillances respiratoires et digestives.

3.2.3.2. La réponse médicale dans le cadre d'un plan blanc élargi

Dans le cadre d'une collaboration entre l'HAD et les hôpitaux conventionnels, les HADs peuvent fournir des soins de restauration alors que les hôpitaux conventionnels peuvent se consacrer aux soins intensifs. Cette coordination pourrait offrir beaucoup d'avantages mutuels. La rééducation à domicile raccourcit la durée du séjour du patient, et favorise la santé physique du patient et la réintégration familiale (Lewin et al., 2014; Tinetti et al., 2002). Ceci est particulièrement vrai pour les pathologies cardiologiques (Frick et al., 2009; Kornowski et al., 1995; Shing, 2011) et les défaillances respiratoires (Appierto et al., 2002; Frick et al., 2009). Une autre amélioration résultant de la collaboration entre l'HAD et l'hospitalisation conventionnelle est la libération du service d'urgence, l'HAD déchargeant directement le système d'urgence sans nécessiter de lits d'hospitalisation (Frick et al., 2009). Une telle collaboration avec le service d'urgence ou un autre service d'hospitalisation peut être planifiée à l'admission du patient sans difficulté, minimisant le stress du personnel et facilitant la gestion du programme de soins du patient.

La structure d'HAD et l'hôpital conventionnel nécessitent une bonne coordination entre eux en termes d'administration de médicaments (par exemple en utilisant un livret pharmaceutique commun) et des soins techniques infirmiers (c'est-à-dire des protocoles de soins). Le livret pharmaceutique définit une liste de médicaments et de dispositifs médicaux (recommandés pour le traitement des pathologies) et fournit des informations sur leur dosage et leurs contre-indications. Le but d'un protocole de soins est d'une part de minimiser le risque iatrogène dû aux erreurs de prescription, et d'autre part de simplifier les soins techniques afin que le soignant soit moins stressé et accorde plus d'attention au patient. La coopération entre les structures d'HAD et les hôpitaux conventionnels ne peut être bénéfique que si ces acteurs ont l'habitude

de travailler ensemble de façon routinière. Ils peuvent tous les deux faire face à la situation de crise avec efficacité dans le cadre d'un plan blanc élargi, en échangeant des patients aigus et en récupérant des patients en rétablissement.

Compte tenu du scénario étudié, nous retenons l'hypothèse d'un plan de gestion des urgences approuvé entre un hôpital conventionnel et l'HAD Soins et Santé. L'objectif d'un tel plan d'urgence est d'améliorer l'efficacité des ressources (lits et infirmiers) en consacrant les soins aigus à l'hôpital conventionnel et les soins de rétablissement à la structure d'HAD. Les lits ne sont pas une contrainte pour les HADs et les infirmiers sont flexibles car ceux sont indépendants. Cependant, le nombre de places est limité en ce qui concerne le nombre de patients traités par infirmier, car la législation du travail limite l'emploi des infirmiers libéraux vis-à-vis des employés.

3.2.4. Le modèle de réponse

3.2.4.1. Modélisation de la maladie: Une extension du modèle SIR

Le modèle compartimental dynamique peut varier en taille et en complexité selon le cas d'étude. L'équation (3.2.1) est une équation générique qui décrit le développement des différents états (stades) du patient

$$X_p^i = X_{p-1}^i + \sum_{k=1}^N X_p^{k,i} - \sum_{l=1}^N X_p^{i,l} \quad (3.2.1)$$

Avec :

- N : le nombre total des états,
- X_p^i : le nombre de patients à l'état i de la période p ,
- $X_p^{k,i}$: le nombre de patients passant de l'état k à l'état i au cours de la période p ,
- $\sum_{k=1}^N X_p^{k,i}$: le nombre total de patients qui passent à l'état i à la période p ,
- $X_p^{i,l}$: le nombre de patients qui passent de l'état i à l'état l à la période p ,
- $\sum_{l=1}^N X_p^{i,l}$: le nombre total de patients qui sortent de l'état i dans la période p .

En général, on peut estimer le nombre de patients passant d'un état à un autre. La méthode la plus utilisée est de multiplier le nombre de patients susceptible de passer de l'état actuel au prochain état, par un taux de transition.

Dans la littérature, et selon le cas d'étude et le type de la maladie modélisée, il y a trois manières d'estimer le taux de transition :

- le taux de transition est un paramètre constant (Hu et Zhao, 2011),
- le taux de transition de l'état i à l'état l , dénoté par $\Psi_p^{i,l}$, est calculé par la fonction de la densité temporelle $f_t^{i,l}$, comme le montre l'équation (3.2.2) (Wein et al., 2003; Craft, Wein, et Wilkins 2005).

$$\Psi_p^{i,l} = \int_0^p f_t^{i,l} dt \quad (3.2.2)$$

- le taux de transition est calculé à partir de la fonction de densité cumulée ($F_t^{i,l}$) et la fonction de la densité de probabilité ($f_t^{i,l}$), comme le montre l'équation (3.2.3).

$$\Psi_p^{i,l} = \int_0^p \int_0^u f_v^{i-2,l} f_{u-v}^{i-1,l} F_{u-p}^{i,l} dudv \quad (3.2.3)$$

Dans le troisième cas, le taux de transition de l'état i aux prochains états est influencé par les taux de transition des états précédents.

Dans notre cas nous optons pour la première méthode, c.à.d, un taux de transition constant d'un état à un autre que nous allons détailler par la suite.

En résumé, le modèle SIR (Susceptible- Infected - Recovered) est connu sous le nom du modèle compartimental en épidémiologie. Dans le cas le plus simple, il peut stratifier la population en trois statuts de santé : sensibles à la maladie (notées par S sur la figure 3.2.1), infectées par la maladie (notée par I sur la figure 3.2.1), et éliminées de la maladie (notées par R sur la figure 3.2.1).

Dans la plupart des cas de la littérature, les personnes infectées seront divisées en plusieurs stades, telles que (Latent : c'est-à-dire sans symptôme, Prodromal : c'est-à-dire avec symptôme et Fulminant : c'est-à-dire sévère / détérioré) (Colizza et al., 2007).

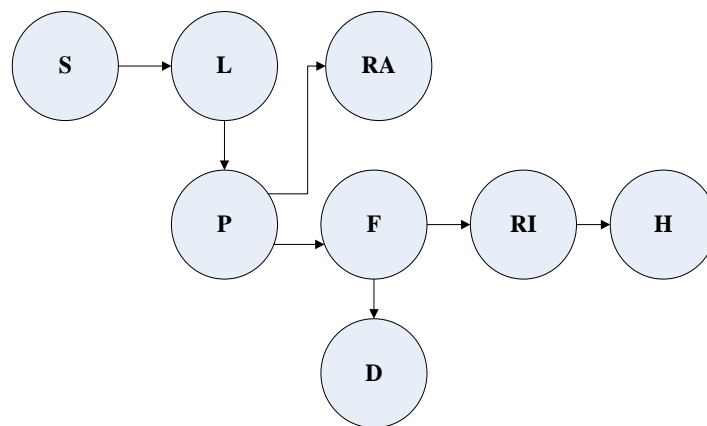


Figure 3.2. 1: Les états de la maladie

Sur la figure 3.2.1, nous avons détaillé l'état de rétablissement R en des états intermédiaires ; RA (c'est-à-dire récupéré avec l'antitoxine), RI et H (c'est-à-dire rétabli avec des soins intensifs en hôpital conventionnel suivi de soins à domicile en HAD). Cela nous permet de modéliser les deux réponses médicales indépendantes. Un autre état D pour la mort a également été défini pour plus de clarté dans le modèle de programmation linéaire ci-dessous.

Nous utilisons une représentation discrète du modèle SIR sur un horizon de périodes journalières. Lorsque la maladie n'est pas transmise directement d'une personne à une autre ou lorsque le taux d'infection est constant, le modèle SIR peut être linéarisé (Büyüktaktakın, des-Bordes, et Kızı, 2018), ce qui est notre cas.

3.2.4.2. Le modèle linéaire

Dans cette section nous allons décrire les différents composants du modèle linéaire.

- **Les données**

– Nbstat: nombre d'états des patients, 8 états ont été définis :

- S : susceptible,
- L : latent,
- P : prodromique
- RA : rétabli avec administration d'antitoxine

F : fulminant
 RI : hospitalisé en USI (Unité de Soins Intensif)
 H : hospitalisé en HAD
 D : décédé

- Nper: Nombre de périodes en jours,
- Nipat: Nombre de patients de l'HAD susceptibles d'être empoisonnés, c'est-à-dire livrés par le traiteur,
- Nepat: nombre de personnes extérieures susceptibles d'être empoisonnées, c'est-à-dire livrées par le traiteur,
- Irat: taux d'infection, c'est-à-dire pourcentage de personnes non infectées par le repas empoisonné
- Prat: taux prodromique, c'est-à-dire pourcentage de personnes développant des symptômes,
- Drat: taux de mortalité, c'est-à-dire le pourcentage de personnes décédées en attente de soins intensifs,
- Canti: coût de l'antitoxine et coût d'hospitalisation des médicaments dans une structure de l'HAD pendant 7 jours,
- Cicu: coût de l'admission du patient pendant deux semaines en unité de soins intensifs suivi de deux semaines en soins à domicile pour l'assistance respiratoire,
- Hlife: estimation du coût de la vie humaine en matière d'indemnité légale en France pour une victime,
- Nbed: Nombre de lits à l'unité de soins intensifs disponibles pour recevoir des victimes à l'hôpital conventionnel,
- Nhome: Nombre de places disponibles pour recevoir des victimes au HAD, l'HAD n'a pas de limite de capacité de lit mais un nombre limité de visites d'infirmiers et des limites d'équipements médicaux,
- HCdose: Nombre de doses d'antitoxine disponibles à la pharmacie de l'HAD,
- CHdose: Nombre de doses d'antitoxine disponibles à la pharmacie de l'hôpital conventionnel,
- Pdet: Période où l'attaque est détectée et localisée sachant que l'attaque criminelle est anonyme,
- Alos: durée de l'hospitalisation pour un traitement antitoxine (en HAD),
- ILos: durée de l'hospitalisation en unité de soins intensifs,
- Hlos: durée de l'hospitalisation à l'hôpital après l'unité de soins intensifs,
- Mlos: Maximum entre Alos et Hlos,

- **Variables de décision**

Trois variables entières ont été définies

- EV_{ksp} : Nombre de personnes d'origine en état k (externes ou internes à l'HAD) qui passent à l'état s pendant la période p,

Avec :

$k= 1, 2$ pour respectivement externe et interne à l'HAD

$s = \{S, L, P, RA, F, RI, H, D\}$

- CHexch: Nombre de doses d'antitoxine envoyées de l'hôpital conventionnel à la pharmacie de l'HAD,
- HCexch: Nombre de doses d'antitoxine envoyées par l'HAD à la pharmacie de l'hôpital conventionnel.

• **Fonction objectif**

$$Minimiser \sum_{k=1}^2 \sum_{p=1}^{Nper} EV_{kDp} * Hlife + \sum_{k=1}^2 \sum_{p=1}^{Nper} EV_{kRIp} * Cicu + \sum_{k=1}^2 \sum_{p=1}^{Nper} EV_{kRAP} * Canti \quad (3.2.4)$$

On vise à minimiser les coûts de la réponse médicale, c'est-à-dire le coût d'indemnisation pour les personnes décédées, le coût des traitements avec antitoxine et les coûts des soins intensifs et d'hospitalisation. Comme le coût de l'indemnisation est environ dix fois plus élevé que les autres coûts, la minimisation du nombre de décès est le critère principal. D'autres auteurs ont utilisé la même approche d'intégration des critères dans l'analyse des risques (Suddle, 2009).

• **Les contraintes**

$$EV_{1S1} = Nepat \quad (C 3.2.2)$$

$$EV_{2S1} = Nipat \quad (C 3.2.2bis)$$

$$EV_{1Sp} = EV_{1S(p-1)} * (1 - Irat) \quad p = 2, \dots, Pdet + 3 \quad (C 3.2.2ter)$$

$$EV_{2Sp} = EV_{2S(p-1)} * (1 - Irat) \quad p = 2, \dots, Pdet + 3 \quad (C 3.2.2quart)$$

Les personnes peuvent être infectées de la première période à la période où l'attaque est détectée et localisée (état S). Les symptômes apparaissent au plus tard 3 jours après la dernière période (Pdet). Les autres personnes sont en sécurité.

$$EV_{kLp} = EV_{kS(p-1)} * Irat \quad p = 2, \dots, Nper \quad k = 1, 2 \quad (C 3.2.3)$$

En utilisant le taux d'infection $Irat$ on peut calculer le nombre de personnes infectées. En effet, les personnes mangeant un repas empoisonné sont infectées (état L).

$$EV_{kPp} = EV_{kL(p-1)} * Prat - EV_{kRA(p-1)} \quad p = 2, \dots, Nper \quad k = 1, 2 \quad (C 3.2.4)$$

Durant les jours suivants l'empoisonnement, seule une partie des personnes développe des symptômes (état P). Les antitoxines sont administrées dès l'apparition des symptômes (état RA), sans attendre la confirmation du test médical (Arnon et al., 2001).

$$\sum_{p=1}^{Nper} EV_{1RAP} \leq CHdose + HCexch - CHexch \quad (C 3.2.5)$$

$$\sum_{p=1}^{Nper} EV_{2RAP} \leq HCdose + CHexch - HCexch \quad (C 3.2.5bis)$$

Le nombre de doses d'antitoxine est limité mais peut être partagé par les deux structures d'hospitalisation (HAD et hôpital). Ils sont dispensés uniquement aux patients prodromiques.

$$EV_{kFp} = EV_{kF(p-1)} * (1 - Drat) + EV_{kP(p-1)} - EV_{kRI(p-1)} \quad p = 4, \dots, Nper \quad k = 1, 2 \quad (C3.2.6)$$

De la période 4 à la fin de l'horizon, les victimes attendent d'être hospitalisées dans les unités de soins intensifs (état F), une partie d'entre elles est admise (Etat RI) et une partie d'entre elles commence à mourir.

$$\sum_{q=p}^{p+ILOS-1} EV_{kRIq} \leq Nbed \quad p = 1, \dots, Nper - ILOS + 1 \quad k = 1, 2 \quad (C3.2.7)$$

Le nombre de lits de soins intensifs est limité pour chaque période. Les patients admis en unité de soins intensifs de la période p à $(p + ILOS-1)$ occuperont un lit pendant les périodes de la durée de séjour $ILOS$.

Les capacités des lits doivent être vérifiées pour chaque valeur $(p + ILOS-1)$.

Propriété: Pour $p = 1$, si la contrainte est satisfaite pour la période $(1 + ILOS-1)$, elle est forcément satisfaite pour les périodes précédentes de 1 à $(1 + ILOS-2)$ grâce à la somme.

$$EV_{kH(p + ILOS)} = EV_{kRIp} \quad p = 4, \dots, Nper - ILOS \quad k = 1, 2 \quad (C3.2.8)$$

Le séjour en HAD suit le séjour de $ILOS$ périodes en unité de soins intensifs dans l'hôpital conventionnel (état H).

$$\sum_{q=p}^{p+MLOS-1} EV_{1RAq} + \sum_{q=p}^{p+MLOS-1} EV_{1RIq} \leq Nhome \quad p = 1, \dots, Nper - MLOS + 1 \quad (C3.2.9)$$

Le nombre de places en HAD est limité mais elles ne sont utilisées que pour une durée de séjour définie, les patients de l'HAD n'augmentent pas la charge de travail de l'HAD car ils sont déjà admis et planifiés. Sur un horizon de périodes $MLOS$, les patients externes recevant des traitements d'antitoxine et les patients externes, en voie de rétablissement venant de l'unité de soins intensifs, sont pris en charge par l'HAD. Nous calculons le nombre de nouveaux patients à la période $(p + MLOS-1)$. La même propriété pour la contrainte (C3.2.7) est vérifiée.

$$EV_{kDp} = EV_{kF(p-1)} * Drat \quad p = 4, \dots, Nper \quad k = 1, 2 \quad (C3.2.10)$$

Les personnes non traitées sont décédées (état D).

3.2.4.3. Expérimentation

3.2.4.3.1. Jeu de données

- Nper: un horizon de trois mois est étudié,
- Nipat: 100 personnes,
- Nepat: 300 personnes,
- Irat: 64%, une personne commande en moyenne 4.5 repas par semaine,
- Prat: taux prodromique, c'est-à-dire pourcentage de personnes développant des symptômes, $85\% = 1-15\%$, avec 15% le taux d'immunogénicité (Naumann et al., 2013),
- Drat: 36% (Hung et al., 2014),
- Canti: coût de l'antitoxine et coût d'hospitalisation dans une structure de l'HAD pendant 7 jours, respectivement 2500 € et $300 € * 7$ soit 4600 €,

- Cicu: coût de l'admission du patient pendant deux semaines en unité de soins intensifs suivi de deux semaines en soins à domicile pour l'assistance respiratoire, respectivement $2300 \text{ €} * 14$ et $300 \text{ €} * 14$ soit 36400 € ,
- Hlife: en France pour une victime âgée de 65 ans, l'indemnisation est de $300\ 000 \text{ €}$ selon l'ONIAM (2018),
- Nhome: 130 places,
- Pdet: l'attaque est supposée criminelle et elle est donc anonyme, il faut donc attendre l'apparition des premiers symptômes sur les patients pour détecter l'attaque, c'est-à-dire 4 jours plus tard,
- Alos: 7 jours,
- ILos: 14 jours,
- Hlos: 14 jours
- Mlos: 14 jours.

3.2.4.3.2. Résultats et analyses

Les stocks stratégiques français d'antitoxine botulique sont d'environ 50 doses (EPRUS, 2013). Cependant, les doses disponibles varieront de 50 à 100 par hôpital. Nous supposons que les doses d'antitoxines disponibles sont distribuées aux HADs et aux hôpitaux conventionnels afin que les antitoxines soient immédiatement disponibles.

Il y a environ 200 lits de soins intensifs dans la métropole de Lyon situés dans 5 hôpitaux différents (Carrie, 2018). Sachant que les lits de soins intensifs sont nécessaires pour la chirurgie et pour plusieurs pathologies de différentes spécialités médicales; nous supposons que 1/4 à 3/4 des lits peuvent être libérés par les hôpitaux pour recevoir des patients empoisonnés. Le nombre de lits de soins intensifs disponibles varie de 50 à 150. Nous supposons un nombre infini de ventilateurs mécaniques, c'est-à-dire de ventilateurs à pression positive pour remédier aux problèmes respiratoires.

Les symptômes apparaissent généralement dans les 72 premières heures (Arnon et al., 2001). Au quatrième jour, on soupçonne que le nombre de victimes qui mangent les aliments du traiteur est élevé; par conséquent le traiteur est au courant de l'attaque au plus tôt à la fin de la période 4 et arrête son activité.

L'empoisonnement accidentel n'a pas été retenu car il aurait d'abord conduit à une découverte de l'incident plus tôt et ensuite à une durée d'apparition plus courte grâce à une source unique de contamination au lieu de plusieurs sources criminelles de contamination. Le pire des cas est étudié.

La réponse médicale à l'attaque biologique est le plan de gestion des urgences partageant les places d'HAD et les lits d'hôpitaux conventionnels. Les lits de soins intensifs sont la ressource nécessaire pour la phase aiguë du botulisme et l'HAD peut soutenir la respiration et l'assistance nutritionnelle pour la phase de rétablissement du botulisme. Une admission du patient pendant deux semaines en unité de soins intensifs suivie de deux semaines en HAD définit le programme de soins du patient. Son coût est égal à $2300 \text{ €} * 14$ et $300 \text{ €} * 14$, soit 36400 € . Le séjour complet équivalent à l'hôpital coûte $2300 \text{ €} * 14$ et $1000 \text{ €} * 14$, soit 46200 € si l'hôpital dispose de suffisamment de ressources, notamment d'infirmiers et de lits. La collaboration entre l'unité

de soins intensifs et l'HAD permet d'optimiser l'utilisation des ressources humaines et matérielles. La différence de coût est expliquée par des frais fixes qui sont plus légers pour les structures de l'HAD qui ne possèdent pas de matériel médical lourd parce que le diagnostic du patient est connu.

15 cas ont été résolus avec CPLEX 12.6.2 pour 5 nombres différents de lits de soins intensifs libérés et 3 différents niveaux de stocks stratégiques d'antitoxine.

Le tableau 3.2.1 présente le nombre de décès, le coût de la réponse médicale en euros et le nombre de séjours en unité de soins intensifs utilisés par les patients de l'HAD et les victimes en hôpitaux conventionnels, pour les 15 cas résolus.

Table 3.2. 1: Nombre de décès et coût de la réponse médicale en fonction de l'intensité des ressources

Nombre de doses pour l'HAD	Nombre de doses pour l'hôpital	Nombre de lits à l'USI	Nombre de décès	coûts médicaux	Nombre de séjours en USI pour les patients d'HAD	Nombre de séjours en USI pour les patients d'hôpital
50	50	50	189	59 027	0	50
50	50	75	164	52 450	0	75
50	50	100	139	45 873	0	100
50	50	125	114	39 298	0	125
50	50	150	89	32 728	20	130
50	100	50	139	44 283	0	50
50	100	75	114	37 708	0	75
50	100	100	89	31 138	0	100
50	100	125	64	24 568	0	125
50	100	150	39	17 999	24	126
100	100	50	89	29 548	0	50
100	100	75	64	22 978	0	75
100	100	100	39	16 409	0	100
100	100	125	15	9 851	11	114
100	100	150	0	6 006	15	125

Le nombre de décès varie de 189 à 0. Il diminue en fonction du nombre croissant de lits disponibles aux soins intensifs dans la même proportion. Un lit d'unité de soins intensifs n'est jamais utilisé deux fois ou plus, car aucune victime ne peut attendre jusqu'à 14 jours, c'est-à-

dire la durée du séjour en unité de soins intensifs. Le nombre de décès diminue d'une manière proportionnelle avec l'augmentation des stocks d'antitoxine quand ceux-ci ne sont pas en excès. Le coût médical passe de 59 027 K€ à 6 006 K€. Il est inversement proportionnel à l'intensité des ressources et résulte des coûts d'indemnisation de la vie humaine.

En ce qui concerne la meilleure réponse médicale, un minimum de 190 doses d'antitoxine avec 150 lits de soins intensifs ou de 200 doses d'antitoxine avec 140 lits de soins intensifs est nécessaire pour une absence de décès. Ces dernières situations ont été évaluées avec notre modèle. Les lits de soins intensifs sont principalement utilisés pour les victimes en dehors de la structure d'HAD et ils sont les plus nombreux. Les patients d'HAD sont principalement traités avec l'antitoxine du moment qu'ils sont déjà pris en charge en HAD.

En ce qui concerne les échanges d'antitoxine entre les pharmacies, les antitoxines en excès sont proposées à l'hôpital partenaire. Le nombre optimal de places en HAD est fixé à 130 et a été calculé avec notre modèle, moins de places font augmenter le nombre de victimes en raison du traitement antitoxine qui a lieu en HAD.

Le nombre de décès peut atteindre 200 et le coût de l'hospitalisation est de plusieurs millions d'euros. Pour faire face à une telle crise, la collaboration entre les hôpitaux conventionnels et les structures de l'HAD est une bonne réponse et doit être soigneusement étudiée et préparée pour augmenter l'efficacité des ressources médicales dans le cadre d'un plan blanc élargi. Au-delà des objectifs spécifiques à chaque structure, le but est de sauver le plus grand nombre de victimes en fournissant la meilleure réponse médicale.

Le nombre de lits dans les hôpitaux conventionnels est limité en raison du budget financier. La collaboration entre un hôpital et une structure de l'HAD dans le cadre d'activités régulières ou de réponse à une menace leur permet d'augmenter les possibilités d'admission des patients en assouplissant la contrainte de capacité hospitalière avec la flexibilité du lit de soins à domicile.

Le centre hospitalier "Soins et Santé" négocie actuellement un plan de gestion des urgences avec un hôpital conventionnel de Lyon qui possède un service des urgences et des unités de soins intensifs.

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons étudié le scénario d'intoxication dans les services de restauration collective impactant les patients pris en charge en l'HAD. Ce travail a étudié l'impact d'une attaque alimentaire avec la toxine botulique, c'est-à-dire l'une des substances les plus toxiques connues dans la restauration collective. Nous avons modélisé l'évolution des états de patients à travers une extension du modèle compartimental SIR. Ainsi, un outil d'optimisation basé sur un modèle de programmation linéaire est proposé, afin de calculer les conséquences humaines et économiques de l'attaque en termes de nombre de décès et de coût de la réponse médicale. Il permet d'évaluer les réponses médicales basées sur la collaboration entre l'HAD et l'hôpital, de dimensionner les ressources humaines et matérielles, d'anticiper l'admission des victimes en unité de soins intensifs et en HAD, de calculer les conséquences de l'attaque afin d'évaluer les opportunités de contremesures (par exemple un service de livraison de repas à domicile dédié à plusieurs hôpitaux).

3.3. Réponse à une menace hydrologique : Régulation entre l'évacuation et le maintien à domicile

Introduction

Dans cette section nous nous intéressons aux crises d'origine naturelle. On vise à développer un nouvel outil pour soutenir les structures de soins à domicile dans la préparation de leur plan de gestion des risques et plus particulièrement dans la phase de réponse. La régulation entre l'évacuation et le maintien à domicile des patients est la décision majeure que les gestionnaires peuvent prendre afin de sécuriser leurs patients. L'outil proposé fournit un plan d'évacuation pour les patients critiques à évacuer et un plan de soutien à domicile pour les patients à risque faible qui seront maintenus à domicile en utilisant des regroupements basés sur l'évaluation du risque de chaque patient. Le modèle combine un modèle de partitionnement dynamique basé sur l'évolution du risque individuel et la proximité géographique entre les patients, et un modèle d'affectation et de localisation tenant compte de coûts fixes et variables.

Les travaux développés dans ce chapitre ont fait l'objet d'une publication qui sera présentée à la conférence internationale INCOM 2018.

3.3.1. Présentation du problème

En cas de catastrophes naturelles telle une crue, les ressources de l'HAD sont concernées et sont mises en première ligne. Pendant la crise, le fonctionnement de la structure de l'HAD est perturbé. Les patients pris en charge par l'HAD doivent être sécurisés et secourus. L'activité principale qui consiste à délivrer les soins aux domiciles est compromise. Certaines visites planifiées seront reportées et d'autres seront annulées. Il en est de même pour l'activité de livraison et de consultation médicale.

Selon (Kreibich et al., 2009), les catastrophes naturelles, telles que les inondations, les tornades, la neige, sont fortement corrélées avec les dommages des infrastructures. Cela pourrait perturber le transport et le déplacement. Les domiciles de certains patients peuvent être ainsi difficilement accessibles voire inaccessibles.

Dans ce chapitre nous nous intéressons aux crises d'origine naturelle et plus particulièrement aux menaces hydrologiques à savoir les crues, la neige, etc. Ces menaces ont la particularité d'être, pour la majorité des cas, prévisibles. Cet aspect de prévisibilité donne une marge d'action considérable aux gestionnaires et leur permet de mettre en place certaines contremesures opérationnelles pour minimiser les dégâts et voire les éviter. En HAD, dès que l'alerte de crue ou d'épisode neigeux est reçue, une cellule de crise doit se mettre en place pour piloter la situation, collaborer avec les tutelles et surtout remonter l'information à la préfecture et à la direction territoriale.

Le processus d'installation et de pilotage de la cellule de crise relatif à l'HAD Soins et Santé est disponible via le lien suivant : <http://www.prhodom.disp-lab.fr/ProcessusPlanBlanc.pdf>

Afin de maintenir l'activité même en mode dégradé, la chaîne logistique de l'HAD peut être réorganisée. Différentes ressources peuvent être employées telles que les infirmiers salariés qui contrôlent habituellement uniquement l'activité de soins. Elles peuvent participer à la délivrance de soins en complément des infirmiers libéraux. De la même manière que les infirmiers salariés, les médecins salariés de l'HAD peuvent participer à l'activité par des visites physiques ou même des visites à distance (visio-consultation).

3.3.2. Outil d'aide à la décision pour répondre à la crise

3.3.2.1. Gestion des risques liés aux crues

Le concept de protection traditionnelle contre les inondations est de plus en plus remplacé par une gestion globale des risques, qui comprend des mesures structurelles et non structurelles (Sayers et al., 2002) Les cartographies de danger et de risque ont une importance particulière pour des fins de planification, de sensibilisation et l'encouragement des mesures préventives.

La "Directive 2007/60 / CE du Parlement européen et du Conseil relative à l'évaluation et la gestion des risques d'inondation exige que les États membres de l'UE élaborent des cartes identifiant le zones exposées à un risque d'inondation et indiquant la probabilité d'inondation pour chacune de ces zones et les dommages potentiels aux populations locales, aux structures, aux bâtiments et à l'environnement. En outre, les décisions concernant les contremesures de mitigation des crues doivent être prises sur la base d'analyses de risques pour qu'ils nous permettent d'évaluer leur rapport coût-efficacité (Ganoulis 2003; Rose et al. 2007; Sayers et al., 2002.).

Dans ce cadre le gouvernement français a mis en ligne un service d'information officiel (<https://www.vigicrues.gouv.fr/>) sur le risque de crues des principaux cours d'eau en France (voir figure 3.3.1). Sur la carte on trouve les différentes stations d'importance. La région lyonnaise est concernée puisqu'elle est traversée par deux cours d'eaux importants (le Rhône et la Saône).

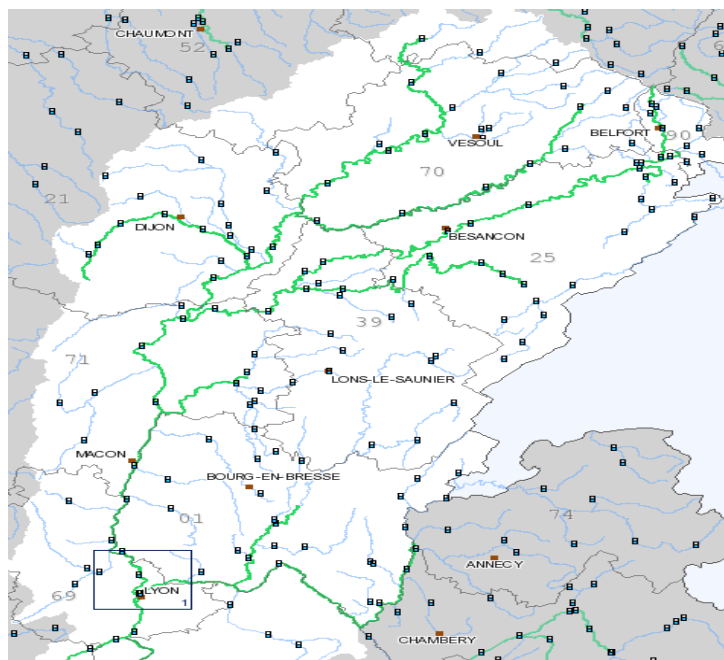


Figure 3.3. 1: Les principaux cours d'eau dans la région Rhône-Alpes

Sur ce site on peut se tenir au courant du risque d'inondation, de l'état de vigilance, de la hauteur des eaux en temps réel, et un historique de ces données qui peut aller jusqu'à 30 jours. La figure 3.3.2 montre le niveau des eaux de la station Pont-la-Feuillee (Saône) le 02/05/2018 à 20h52.

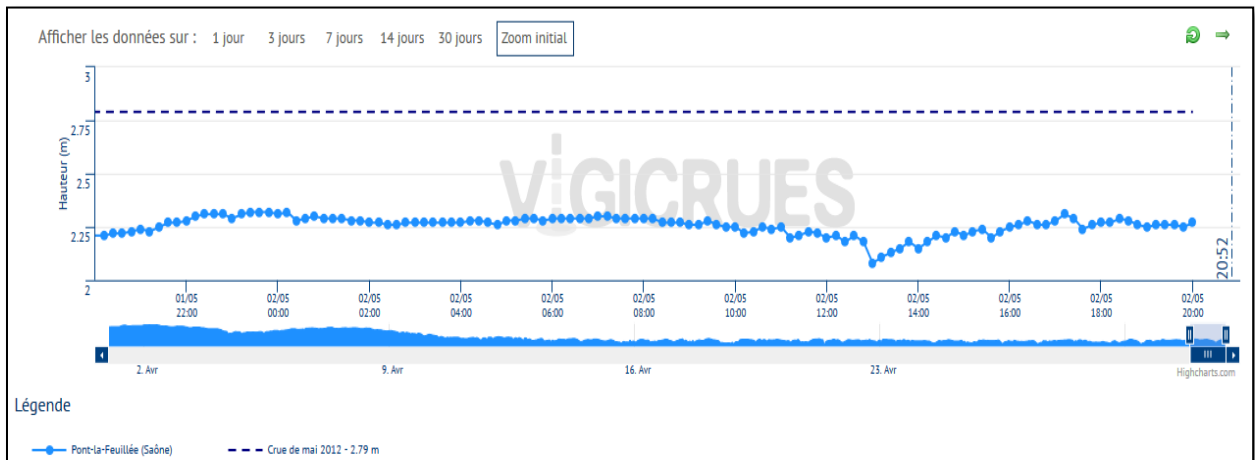


Figure 3.3. 2: Niveau d'eau à la station Pont-la-Feuillee (Saône)

Les informations sur ce site ainsi que la coordination avec les services concernées et la cellule de crise permettent aux décideurs de mieux cerner la menace et mieux gérer la situation.

Dans le cadre de notre travail, nous proposons d'abord une méthode d'évaluation du risque individuel par patient en prenant en compte plusieurs paramètres, dont l'évolution de la crue dans le temps.

3.3.2.2. Estimation de risque individuel par patient

Selon (Cançado et al., 2008), le risque total de la crue peut être calculé à partir de la formule (3.3.1) :

$$Risque = Alea * Vul \tag{3.3.1}$$

Avec :

- *Alea* : le niveau de risque qui prend en compte la probabilité que la crise survienne ainsi que les caractéristiques physiques de la crue. Dans notre cas on ne va pas prendre la probabilité en compte faute de donnée. On va se mettre dans le cas où la crise est arrivée (probabilité=1) et préparer le plan d'action (le plan blanc).
- *Vul* : le niveau de vulnérabilité.

3.3.2.2.1. Estimation de « Alea »

En se basant sur les caractéristiques physiques de la crue, (Cançado et al., 2008) définissent trois classes d'Alea présentées dans le tableau suivant.

Table 3.3. 1: Qualification des caractéristiques physiques de la crue

Qualification	Conditions
Haut	$hauteur(p) > 1.5 \text{ m}$ ou $vel(p) > 1.5 \text{ m/s}$
Moyen	$0.5 \text{ m} < hauteur(p) < 1.5 \text{ m}$ ou $0.5 \text{ m/s} < vel(p) < 1.5 \text{ m/s}$

Bas	$0.1m < hauteur(p) < 0.5m$ et $0.1m/s < vel(p) < 0.5m/s$
-----	---

Avec :

- $Hauteur(p)$: la hauteur de la crue à la période p,
- $Vel(p)$: la vitesse de la crue à la période p,

L'accès aux domiciles est très dépendant de l'état des rues surtout en milieu urbain. Une investigation a été faite en Allemagne dans 5 municipalités (Dresden, Dobeln, Eilenburg, Floha et Grimma) qui ont été touchées par la crue d'août 2002 (Kreibich et al., 2009) qui a montré que les dégâts des infrastructures routières sont fortement corrélés avec l'intensité (In) de la crue (Kreibich et al., 2009). L'intensité de la crue à une période donnée p $In(p)$ est calculée conformément à l'équation (3.3.2).

$$In(p) = hauteur(p) * vel(p) \tag{3.3.2}$$

Dans notre travail on estime l'Alea à partir de l'intensité puisqu'ils sont fortement corrélés.

Le tableau 3.3.2 présente la classification des intensités en trois classes (1, 2 et 3) selon les valeurs des caractéristiques physiques de la crue présentées dans le tableau 3.3.1.

Hypothèse : On suppose que la vitesse de la crue ainsi que la hauteur sont constantes durant une période p.

Table 3.3. 2: Classification des Alea selon les valeurs de In

Qualification	Intensité In	Notation d'Alea
Haut	$In > 2.25$	3
Moyen	$In > 0.25$ et $In \leq 2.25$	2
Bas	$In \leq 0.25$	1

3.3.2.2.2. Calcul de la vulnérabilité individuelle de chaque patient $Vul(i,p)$

Dans cette étude on va se focaliser sur la vulnérabilité d'accès qui est fortement liée à la proximité géographique du risque d'une part, et l'état du patient d'autre part.

3.3.2.2.2.1 Proximité géographique de la source de risque (la crue)

Cette proximité peut être calculée par la distance liant le domicile à la source de risque. Cette distance évolue en fonction du temps selon la vitesse de propagation de la crue, c.-à-d. la vitesse.

$$DR(i, 0) = D_0 \tag{3.3.3}$$

$$DR(i, p + 1) = D(i, p) - vel(p) * DT \tag{3.3.4}$$

Avec :

- D_0 : distance initiale entre le domicile du patient et la source potentielle de la crue (une rivière),
- $DR(i, p)$: distance entre le domicile du patient i et la source de risque (la crue) à la période p,
- DT : durée d'une période p,

Le tableau 3.3.3 définit des seuils de proximité pour déterminer les classes de proximité.

Table 3.3. 3: Définition des classes de proximité

Distance $DR(i,p)$	Conditions	Notation de la proximité
Haut	$D(i,p) \leq 1000m$	3
Moyen	$1000m < D(i,p) \leq 2000m$	2
Bas	$2000m < D(i,p)$	1

3.3.2.2.2. Evaluation de l'état du patient

L'Indice de Karnovsky est une donnée qui nous permet d'avoir une idée sur l'état global du patient. On va utiliser l'indice de Karnovsky IK pour définir des classes de patients conformément au tableau 4.4.

Table 3.3. 4: Définition des classes de patients par indice de Karnovsky

IK	Description de l'état	Classe de IK
80%-100%	Capable de mener une activité normale	1
40%-70%	Incapable de travailler, capable de vivre chez lui et d'assumer ses besoins personnels, une assistance est nécessaire.	2
10%-30%	Incapable de s'occuper de lui-même, nécessite des soins hospitaliers ou les équivalents.	3

Pour estimer la vulnérabilité des patients en prenant en compte les deux critères de proximité et d'indice de Karnovsky (IK), on va faire une grille de jugements croisés. Le tableau 4.5 représente la classification de vulnérabilité des patients en 3 classes en se basant sur les classes de proximité et l'état du patient présenté par l'indice de Karnovsky.

Table 3.3. 5: Classification de vulnérabilité des patients

Classe de IK	3	2	3	3
	2	1	2	3
	1	1	1	2
		1	2	3
	Classe de proximité (p)			

Par conséquent on peut calculer le risque individuel par patient par période en utilisant l'équation (3.3.5).

$$RL_{ip} = Alea(p) * Vul(i,p) \tag{3.3.5}$$

Avec :

- RL_{ip} : Niveau de risque (risk level) du patient i pendant la période p .

Par conséquent, on peut définir 3 classes de patients suivant le degré du risque (voir tableau 3.3.6).

Table 3.3. 6: Classification des patients par niveau de risque

Qualification du risque	Conditions	Notation
Haut	$6 < RL_{ip} \leq 9$	3
Moyen	$3 < RL_{ip} \leq 6$	2
Bas	$1 \leq RL_{ip} \leq 3$	1

3.3.2.2.3. Analyse d'un point de vue logistique

La crue est une crise qui s'étend sur la durée, il faut donc mener une étude multi-période. En utilisant la méthode proposée ci-dessus on peut classer les patients en trois classes de risque par période.

Il y a deux grandes décisions logistiques à prendre face à l'évolution de la crise. Connaissant le niveau de risque du patient qui affecte l'accessibilité de son domicile, les décideurs doivent prendre la décision de garder le patient à domicile et lui garantir un niveau de service acceptable (nombre de visites, délai de livraison, etc.) ou, l'évacuer vers un lieu sûr où il peut poursuivre son programme de soins. L'évacuation peut être faite vers un hôpital conventionnel. Néanmoins les hôpitaux ont des capacités d'accueil bien limitées, et cette contrainte va s'aggraver surtout en temps de crise lorsque les hôpitaux doivent faire face à des afflux massifs. La solution est d'établir des lieux d'hébergement éphémères (hôpital temporaire).

Suivant la réglementation française, chaque commune doit définir dans son plan communal de sauvegarde des lieux de rassemblement potentiels. Ces lieux peuvent être utilisés comme des hôpitaux éphémères sous la houlette de la structure d'HAD. Ces lieux doivent répondre à un certain nombre de critères en termes de localisation, accessibilité, etc.

Nous avons pu identifier une liste des lieux d'hébergement éphémères potentiels :

- Bâtiment administratif,
- Camping avec tentes,
- Camp militaire avec tentes,
- Colonie de vacances,
- Eglises/temples/Mosquée/Synagogue,
- Entrepôts,
- Gymnases,
- Hangar d'avions,
- Hôtels,
- Salle de congrès,
- Salle des fêtes,
- Ecoles, lycées,

- Stades avec tentes...

On évitera les sites qui ne sont pas en dur.

La sélection de ces lieux doit répondre à un certain nombre de critères.

3.3.2.2.3.1. Critères de sélection du plus important au moins important

Ci-dessus on définit une liste non exhaustive des critères de sélection des lieux d'hébergement éphémères.

- Vulnérabilité du site (inondable, sismicité...),
- Infrastructure (superficie, murs, toiture, planché...),
- Alimentation électrique et groupe électrogène,
- Alimentation en eau,
- Durée de mise à disposition du site,
- Transport,
- Parking (ambulances, personnel, familles...),
- Chauffage,
- Eclairage du site,
- Clôture/fermeture du site,
- Personnel de sécurité,
- Aires de livraison/stockage (équipement, médicaments, DMS, nourriture, linge...),
- Sanitaires/douches,
- Accessibilité pour personnes handicapées,
- Aires de déchèterie (ordure ménagère, DASRI...),
- Cuisine (préparation, déconditionnement) et lieu de restauration (patients, personnel),
- Capacité de communication numérique (téléphone, internet...),
- Air conditionné/ventilation,
- Gaz médicaux (obus),
- Aire de réception des familles,
- Aire de décontamination des patients...

3.3.2.3.3.2. Problème de regroupement des patients

La particularité des HADs est que les patients sont généralement des personnes âgées et principalement dépendantes. En général, les patients de l'HAD ne peuvent pas se déplacer seuls de leurs domiciles à des points de rassemblement (pick-up points), surtout en temps de crise. Cela peut faire une différence majeure avec le problème de BEP (Bus Evacuation Problem) où les évacués sont collectés dans certains points prédéfinis.

Il est fastidieux de traiter les patients au cas par cas afin de savoir si nous les gardons aux domiciles ou nous devons les évacuer. L'idée est de regrouper les patients par zone géographique en tenant compte de leurs niveaux de risque. Cette zone géographique limitée où les patients sont regroupés peut être considérée comme un point de collecte.

Le premier critère de partitionnement est le niveau de risque RL_{ip} . Les patients ayant le même niveau de risque et qui ont plus ou moins la même difficulté d'accès peuvent appartenir au même groupe. L'autre dimension que nous considérons dans notre partitionnement est la proximité géographique, de sorte que nous pouvons contrôler la distance maximale entre les patients

appartenant au même groupe. Sachant que l'intensité de la crise évolue avec le temps, le niveau de risque de chaque patient peut également évoluer, et le groupement (partitionnement) des patients peut changer d'une période à une autre. Sur la base de ce groupement (partitionnement) dynamique, nous pouvons affecter les ressources (infirmiers, médecins, etc.) aux zones en tenant compte du nombre de patients par groupe mais aussi du niveau d'inaccessibilité. Notre modèle peut évaluer le temps requis pour traiter les patients, mais nous ne considérons pas le problème de routage. Le choix de l'étendue de la « zone » nous permet de contrôler la distance maximale que la ressource peut parcourir d'un patient à un autre appartenant au même groupe. De la même manière, le groupement des patients facilitera le processus d'évacuation puisque les patients à évacuer appartenant à un groupe seront géographiquement concentrés. Ceci minimise le déplacement des ressources qui peut être difficile en cas de catastrophe.

3.3.2.2.4. Point de vue de la modélisation

D'un point de vue de la modélisation mathématique le problème regroupe plusieurs sous problèmes à savoir :

- Partitionnement dynamique (dynamic set partitioning problem) : un problème de regroupement des patients dans chaque période. Dans chaque période, chaque patient doit appartenir à un groupement.
- Problème d'affectation : il s'agit aussi d'un problème d'affectation à coûts composés de partie fixe et partie variable. Il faut affecter les ressources (infirmiers, médecins, etc.) pour prendre en charge les patients maintenus aux domiciles mais aussi les patients évacués vers les lieux d'hébergement éphémères ouverts.
- Problème de localisation : il s'agit d'une sélection des lieux d'hébergement éphémères à ouvrir selon le nombre de patients à évacuer, la proximité géographique et la difficulté de déplacement.

3.3.2.2.5. Modèle linéaire de régulation entre l'évacuation et le maintien à domicile

Dans cette section, nous définissons les principales entrées et sorties du modèle.

- Données d'entrée :
 - Connaissance de l'évolution de la crue,
 - Localisation des patients, distance entre les différents patients, distance entre les patients et les hôpitaux conventionnels / temporaires.
 - Evolution du niveau de risque dans le temps de chaque patient à l'aide de la méthode de classification des patients suivant les classes de risques
- Les résultats de sortie :
 - Partitionnement des patients par période,
 - Les réponses aux questions sur le devenir des patients : quels patients doivent être gardés aux domiciles et quels patients doivent être évacués et où doit on les évacuer ?
 - Ainsi les réponses aux questions sur les ressources à affecter : combien de ressources doivent être affectées aux zones non évacuées (c'est-à-dire aux patients restant aux domiciles) ? Et combien de ressources doivent être affectées aux hôpitaux temporaires ?

Dans ce qui suit, nous présentons les différentes composantes du modèle.

- Données et paramètres
- NP : nombre de patients,
- M : nombre maximal de groupements de patients,
- T : nombre de périodes étudiées,
- $Ntype$: nombre de types de ressources requis (exemple : médecins et infirmiers)
- $Nres(l)$: nombre de ressources différentes de type l, (exemple : libéral et salarié)
- Cap_{kl} : nombre d'heures de travail autorisées qui peuvent être effectuées par la ressource k, de type l, par période,
- Cap_{evac} : nombre d'heures de travail autorisées qui peuvent être effectuées par ressources d'évacuation par période,
- RL_{ip} : Niveau de risque du patient i dans la période p. Nous avons défini 3 classes de risque (1, 2, 3), l'évolution de la crue étant connue,
- RLC_{ij}^p : Un paramètre binaire, il est égal à 1 si les patients i et j ont le même niveau de risque au cours de la période p ($RL_{ip} = RL_{jp}$),
- $Rcost_{kl}$: coût horaire d'emploi d'une ressource k de type l,
- $Evacost$: coût horaire d'emploi d'une ressource d'évacuation,
- $THOcost$: coût d'installation et de préparation d'un hôpital temporaire : le coût d'ouverture dépend de la taille (c.-à-d. du nombre de lits)
- $FoncTH$: coût de fonctionnement d'un hôpital temporaire,
- $Loss$: manque à gagner par patient réhospitalisé par période. Lors d'une réhospitalisation le patient n'est plus pris en charge par l'HAD, et par conséquent c'est un manque à gagner pour l'HAD,
- NH : nombre d'hôpitaux conventionnels,
- NTH : nombre d'hôpitaux temporaires potentiels à ouvrir,
- V_{hp} : vitesse moyenne d'accès au groupe de patients h pendant la période p. Cela dépend du niveau de risque des patients appartenant au groupe h dans la période p,
- D_{ij} : distance entre le domicile du patient i et le domicile du patient j,
- T_{max} : temps de trajet maximal autorisé entre deux patients appartenant au même groupe,
- DPH_{in} : distance entre le patient i et l'hôpital conventionnel n,
- $DPTH_{im}$: distance entre le patient i et l'hôpital temporaire m,
- $Nbeds_{H_n}$: nombre de lits dans l'hôpital conventionnel n,
- $Nbeds_{TH_m}$: nombre de lits dans l'hôpital temporaire m,.

- α : un réel supérieur ou égal à 1. L'inaccessibilité du domicile de patient est proportionnelle à l'intensité de la crise, α est le coefficient d'inaccessibilité. Ainsi $(\alpha * RL_{ip})$ représente le degré d'inaccessibilité du patient i à la période p .
 - β : une pénalité qui représente le risque encouru par un patient non évacué selon sa classe de risque, c 'est l'équivalent de l'indemnisation demandé pour une vie humaine perdue,
 - $\rho(RL_{ip})$: une valeur entre 0 et 1 qui représente la probabilité de décès d'un patient non évacué ayant un niveau de risque RL_{ip} en période p ,
 - HV : une grande valeur (999,999).
- Variable de décision
 - X_{kl}^{hp} : variable entière, elle est égale à la quantité horaire de ressource k de type l utilisée affectées au groupe de patient h (ou hôpital temporaire) pendant la période p ,
 - W_{hp} : variable binaire, elle est égale à 1 si le groupe de patients h est évacué à la période p ,
 - Y_{ih}^p : variable binaire, elle est égale à 1 si le patient i appartient au groupe h pendant la période p ,
 - TH_{mp} : variable binaire, elle est égale à 1 si l'hôpital temporaire m est ouvert au début de la période p ,
 - THO_m : variable binaire, elle est égale à 1 si l'hôpital temporaire m a été ouvert pendant l'horizon T ,
 - EH_{ih}^{np} : variable binaire, elle est égale à 1 si le patient i appartenant au groupe de patients h est évacué à l'hôpital n pendant la période p ,
 - ETH_{ih}^{mp} : variable binaire, elle est égale à 1 si le patient i appartenant au groupe de patients h est évacué vers un hôpital temporaire m au cours de la période p .

• La fonction objectif

$$\begin{aligned}
 \text{Min } (Z) = & \sum_{l=1}^{Ntype} \sum_{k=1}^{Nres(l)} \sum_{h=1}^{M+NTH} \sum_{p=1}^T (X_{kl}^{hp} * Rcost_{kl}) \\
 & \sum_{m=1}^{NTH} (THO_m * THOcost) + \sum_{m=1}^{NTH} \sum_{p=1}^T (TH_{mp} * FoncTH) \\
 & \sum_{i=1}^{NP} \sum_{h=1}^M \sum_{n=1}^{NH} \sum_{p=1}^T \left((2 * \alpha * RL_{ip} * \frac{DPH_{in}}{V_{hp}} * Evacost + Loss * (T - p + 1)) * EH_{ih}^{np} \right) \\
 & \sum_{i=1}^{NP} \sum_{h=1}^M \sum_{m=1}^{NTH} \sum_{p=1}^T \left(2 * \alpha * RL_{ip} * \frac{DPH_{im}}{V_{hp}} * Evacost * ETH_{ih}^{mp} \right)
 \end{aligned}$$

$$\sum_{i=1}^{NP} \sum_{h=1}^M \sum_{p=1}^T ((\rho(RL_{ip}) * \beta * (Y_{ih}^p - (\sum_{n=1}^{NH} EH_{ih}^{np} + \sum_{m=1}^{NTH} ETH_{ih}^{mp}))) \quad (3.3.6)$$

La fonction objectif comporte les coûts suivants :

- Le coût d'emploi des ressources affectées aux domiciles en prenant en compte la difficulté d'accès,
- Le coût d'emploi des ressources affectées aux hôpitaux temporaires pour les patients évacués.
- Le coût d'installation et de fonctionnement des hôpitaux temporaires,
- Le coût d'évacuation vers les hôpitaux conventionnels et temporaires, avec le souci de minimiser le temps de transport lors de l'affectation des patients aux hôpitaux,
- Le manque à gagner pour les patients réhospitalisés,
- Le coût d'évacuation vers les hôpitaux temporaires en prenant en compte la difficulté d'accès, et les allers-retours pour les transports,
- Le coût du risque (pénalités) lié aux patients non évacués.

Notons que le coût du risque lié à la vie humaine est beaucoup plus important que les autres coûts.

D'autres auteurs ont utilisé la même approche d'intégration des critères dans l'analyse des risques (Suddle, 2009).

- Les Contraintes

$$\sum_{h=1}^M Y_{ih}^p = 1; \forall i \quad (C3.3.1)$$

Au début de la crise, on suppose que tous les patients sont à leurs domiciles et chaque patient appartient à un groupe unique.

$$\sum_{h=1}^M Y_{ih}^p = 1 - (\sum_{h=1}^M \sum_{n=1}^{NH} \sum_{q=1}^{p-1} EH_{ih}^{nq} + \sum_{h=1}^M \sum_{m=1}^{NTH} \sum_{q=1}^{p-1} ETH_{ih}^{mq}); \forall i, \forall p = 2..T \quad (C3.3.2)$$

A partir de la période 2, nous prenons en compte l'évacuation. Un patient évacué n'a plus besoin d'être affecté à un groupe. Les patients qui ont été évacués avant la période p ne sont plus concernés par le regroupement.

$$\alpha * RL_{ip} * \frac{D_{ij}}{V_{hp}} * (Y_{ih}^p + Y_{jh}^p + RLC_{ij}^p - 2) \leq T_{max}; \forall i, \forall j, \forall p, \forall h = 1..M \quad (C3.3.3)$$

Cette contrainte assure le regroupement (partitionnement). Les patients appartenant à un même groupe doivent avoir le même niveau de risque. La distance séparant deux patients appartenant au même groupe ne doit pas dépasser T_{max} . La difficulté de déplacement en temps de crise a été prise en compte via le degré d'accessibilité ($\alpha * RL_{ip}$) et la vitesse de déplacement V_{hp} .

$$\sum_{h=1}^M \sum_{n=1}^{NH} \sum_{p=1}^T EH_{ih}^{np} + \sum_{h=1}^M \sum_{m=1}^{NTH} \sum_{p=1}^T ETH_{ih}^{mp} \leq 1; \forall i \quad (C3.3.4)$$

Un patient est évacué une seule fois pendant tout l'horizon et aucun retour n'est autorisé après l'évacuation jusqu'à la fin de la crise.

$$\sum_{n=1}^{NH} EH_{ih}^{np} + \sum_{m=1}^{NTH} ETH_{ih}^{mp} \leq Y_{ih}^p; \forall i, \forall p, \forall h = 1..M \quad (C3.3.5)$$

Les patients sont évacués de la zone où ils se trouvent.

$$W_{hp} \leq \sum_{i=1}^{NP} Y_{ih}^p; \forall p, \forall h = 1..M \quad (C3.3.6)$$

Nous n'évacuons pas une zone vide. Le groupement doit contenir au moins un patient à évacuer.

$$\sum_{i=1}^{NP} \sum_{n=1}^{NH} EH_{ih}^{np} + \sum_{i=1}^{NP} \sum_{m=1}^{NTH} ETH_{ih}^{mp} \leq W_{hp} * HV; \forall p, \forall h = 1..M \quad (C3.3.7)$$

Les patients ne sont pas affectés aux hôpitaux conventionnels ou temporaires sans que le groupe de patients soit évacué. L'évacuation multi-destination est autorisée, c'est-à-dire que les patients appartenant au même groupe peuvent être évacués vers différents endroits.

$$\sum_{p=1}^T TH_{mp} \leq THO_m * T; \forall m \quad (C3.3.8)$$

Nous ne pouvons pas ouvrir un hôpital temporaire à moins qu'il ne soit préparé et prêt à recevoir les patients.

$$\sum_{q=p}^T TH_{mq} \leq TH_{mp} * (T - p + 1); \forall m, \forall p \quad (C3.3.9)$$

Le retour des évacués n'est pas autorisé jusqu'à la fin de la crise. Si un hôpital temporaire est ouvert, il sera maintenu ouvert jusqu'à la fin de la crise.

$$\sum_{i=1}^{NP} \sum_{h=1}^M ETH_{ih}^{mp} \leq TH_{mp} * HV; \forall m, \forall p \quad (C3.3.10)$$

Nous ne pouvons pas affecter des patients à des hôpitaux temporaires fermés.

$$\sum_{i=1}^{NP} \sum_{h=1}^M \sum_{p=1}^T ETH_{ih}^{mp} \leq Nbeds_TH_m; \forall m \quad (C3.3.11)$$

La capacité en termes de nombre de lits dans les hôpitaux temporaires doit être respectée.

$$\sum_{i=1}^{NP} \sum_{h=1}^M \sum_{p=1}^T EH_{ih}^{np} \leq Nbeds_H_n; \forall n \quad (C3.3.12)$$

La capacité en termes de nombre de lits dans les hôpitaux conventionnels doit être respectée.

$$\sum_{i=1}^{NP} \sum_{n=1}^{NH} EH_{ih}^{np} + \sum_{i=1}^{NP} \sum_{m=1}^{NTH} ETH_{ih}^{mp} \geq (W_{hp} - 1) * HV + \sum_{i=1}^{NP} Y_{ih}^p; \forall p, \forall h = 1..M \quad (C3.3.13)$$

Si un groupe de patients est évacué ($W_{hp} = 1$), tous les patients appartenant à ce groupe à la période p doivent être évacués vers les hôpitaux conventionnels ou temporaires dans la même période,

$$\sum_{k=1}^{Nres(l)} X_{kl}^{hp} \geq \sum_{i=1}^{NP} (\alpha * RL_{ip} * Y_{ih}^p) - W_{hp} * HV; \forall l, \forall p, \forall h = 1..M \quad (C3.3.14)$$

La contrainte (C3.3.14) est centrale. C'est ici que la décision d'évacuation ou de maintien est prise. Les patients sont donc soit pris en charge à domicile avec un taux de ressources intensif

qui dépend du niveau d'inaccessibilité, ou sont évacués. Lors du maintien à domicile, les ressources mettent plus de temps pour accéder au domicile à cause de la difficulté d'accès, exprimée par le degré d'inaccessibilité ($\alpha * RL_{ip}$).

$$\sum_{k=1}^{Nres(l)} X_{kl}^{mp} \geq \sum_{i=1}^{NP} \sum_{h=1}^M \sum_{q=1}^p ETH_{ih}^{mq}; \forall l, \forall p, \forall m = M + 1..M + NTH \quad (C3.3.15)$$

Cette contrainte assure l'affectation des ressources aux hôpitaux temporaires pour prendre en charge les patients évacués.

$$\sum_{k=1}^{Nres(l)} X_{kl}^{mp} \leq TH_{mp} * HV; \forall l, \forall p, \forall m = M + 1..M + NTH \quad (C3.3.16)$$

Nous n'attribuons pas de ressources aux hôpitaux temporaires fermés.

$$\sum_{h=1}^{M+NTH} X_{kl}^{hp} \leq Cap_{kl}; \forall k, \forall l, \forall p \quad (C3.3.17)$$

La capacité des ressources doit être respectée.

$$\sum_{i=1}^{NP} \sum_{h=1}^M \sum_{n=1}^{NH} (2 * \alpha * RL_{ip} * \frac{DPH_{in}}{V_{hp}} * EH_{ih}^{np}) + \sum_{i=1}^{NP} \sum_{h=1}^M \sum_{m=1}^{NTH} \left(2 * \alpha * RL_{ip} * \frac{DPTH_{im}}{V_{hp}} * ETH_{ih}^{mp} \right) \leq Capevac; \forall k \quad (C3.3.18)$$

La capacité des ressources d'évacuation doit être. On prend en compte les allers-retours entre les hôpitaux (conventionnels et temporaires) et les domiciles des patients compte tenu de la difficulté de déplacement.

$$RL_{ip} - 2 \leq \sum_{n=1}^{NH} \sum_{h=1}^M \sum_{q=1}^p EH_{ih}^{nq} + \sum_{m=1}^{NTH} \sum_{h=1}^M \sum_{q=1}^p ETH_{ih}^{mq}; \forall i, \forall p \quad (C3.3.19)$$

Cette contrainte nous permet de respecter un aspect de qualité et de risque. Les patients qui auront un niveau de risque élevé ($RL_{ip}=3$) dans la période p, doivent être évacués au plus tard à la période p, ce qui signifie qu'ils peuvent être évacués avant.

Cette contrainte a également pour rôle de dimensionner la taille minimale des hôpitaux temporaires. S'il n'y a pas suffisamment de lits disponibles pour recevoir les patients à haut risque ($RL_{ip}=3$), le solveur retourne une solution infaisable. Ainsi, nous devons augmenter le nombre de lits ou ouvrir un autre hôpital temporaire.

3.3.3. Expérimentation numérique

3.3.3.1. Jeu de données

Ci-dessous ce sont les valeurs numériques des paramètres que nous utilisons dans notre expérimentation.

- NP : 65,
- M : 65,
- T : 10 jours,
- $Ntype$: 2, {médecins et infirmiers},
- $Nres(l)$: 2, {libéral et salarié},

- Cap_{kl} : le tableau 4.7 résume les données d'expérimentation relatives au paramètre cap_{kl} en termes de nombre d'heures de travail par période.

Table 3.3. 7: Capacité des ressources

	Infirmiers	Médecins
Liberal	150	80
Salarié	80	100

- $Capevac$: 32,
- $Rcost_{kl}$: le tableau 4.8 résume les données d'expérimentation relatives au paramètre $Rcost_{kl}$.

Table 3.3. 8: Coût horaire d'emploi des ressources

	Infirmiers	Médecin
Libéral	40	30
Salarié	50	40

- $Evacost$: 60,
- $THOcost$: 10.000 pour 15 lits et 8.000 pour 10 lits,
- $FoncTH$: 3000 pour 15 lits et 2000 pour 10 lits,
- $Loss$: 500 par période,
- NH : 2,
- NTH : 4,
- V_{hp} : 50, 30, 20 km/h pour, respectivement, $RL_{ip} = 1,2,3$,
- D_{ij} : matrice de distance : on utilisé un ensemble de patients de l'HAD Soins et Santé,
- T_{max} : 0.5 heures,
- DPH_{in} : une matrice de distance a été générée aléatoirement,
- $DPTH_{im}$: une matrice de distance a été générée aléatoirement,
- $Nbeds_{H_n}$: 5 lits disponibles par hôpital conventionnel,
- $Nbeds_{TH_m}$: 2 hôpitaux temporaires à 15 places chacun et 2 autres à 10 places chacun.
- α : 1,
- β : en France pour une victime âgée de 65 ans, l'indemnisation est de 300 000 € selon l'ONIAM (2018).
- $\rho(RL_{ip})$: 0 , 0.2 et 1 pour, respectivement, $RL_{ip} = 1,2,3$,

Toutes les expérimentations ont été effectuées avec CPLEX 12.6.2. Le temps de calcul moyen est de 3 minutes.

3.3.3.2. Résultat

En ce qui concerne les coûts, nous distinguons deux types de coûts. Les coûts de pénalité qui sont liés à la probabilité de décès des patients non évacués et à la valeur de la pénalité β . Ces coûts sont visiblement plus élevés que les autres coûts qui concernent essentiellement les coûts d'évacuation, les coûts de soutien à domicile et les autres coûts définis dans la fonction objective.

Outre les différents coûts, il convient de souligner d'autres paramètres importants, à savoir la dernière période d'évacuation qui sera dénommée LP_{evac} . Ce paramètre est important pour la mise en œuvre du plan d'évacuation. A cette date (c'est-à-dire LP_{evac}), le plan d'évacuation devrait être déjà terminé. LP_{evac} indique donc la date limite pour que tous les patients soient pris en charge d'une manière sûre (à domicile ou dans un hôpital ou un lieu d'hébergement éphémère).

Une analyse de sensibilité peut être effectuée afin d'évaluer la sensibilité de cet indicateur vis-à-vis de certains paramètres critiques tels que la capacité des ressources d'évacuation ($capevac$). Le dimensionnement des ressources d'évacuation est important pour la bonne mise en œuvre du plan d'action. Ce sont des ressources critiques dont le dimensionnement influe sur la décision concernant l'action à mettre en œuvre vis-vis du patient.

Le tableau 3.3.9 présente les résultats de la simulation pour différentes valeurs « $capevac$ » et pour $T_{max} = 0,5$.

Notez que les « autres coûts » du tableau 3.3.9 représentent le coût du soutien à domicile, le coût d'installation et de fonctionnement des hôpitaux temporaires et les différents coûts liés au processus d'évacuation.

Table 3.3. 9: Résultats de simulation pour différentes valeurs " $capevac$ "

<i>Capevac</i> (en heures)	Coût de pénalité	Autres coûts	Coût total	<i>LP_{evac}</i>
8	INF*	INF*	INF*	INF*
16	1960000	498335	2458335	5
24	1120000	499222	1619222	4
32	1120000	502531	1622531	3
40	1120000	501701	1621701	3

INF*: Solution infaisable

Comme nous pouvons le voir dans le tableau 3.3.9, nous avons besoin d'un nombre de ressources suffisant pour obtenir une solution faisable (plus de 8 heures de travail par période) pour évacuer les patients qui atteignent le niveau de risque 3 (C3.3.19). Les coûts de pénalité sont fortement impactés lorsqu'il n'y a pas suffisamment de ressources pour évacuer les patients à niveau de risque moyen ($RL_{ip} = 2$), ce qui entraîne un coût de pénalité supplémentaire par période de séjour à domicile pendant la crise.

De la même manière que les coûts de pénalité, LP_{evac} diminue lorsque $capevac$ augmente jusqu'à une certaine valeur (32). Au-dessus de cette valeur, LP_{evac} reste constant et ceci est dû aux lits libres limités pour recevoir les évacués.

Concernant les autres coûts, ils restent légèrement variables par rapport aux coûts de pénalité. Comme nous pouvons le remarquer, le coût total est composé essentiellement des frais de pénalité.

En ce qui concerne l'étendue T_{max} de la zone contenant le groupe de patients ainsi que le paramètre α , le tableau 3.3.10 rapporte la valeur de la fonction objective pour des combinaisons différentes de ces deux paramètres.

Table 3.3. 10: Impact du paramètre α et de l'étendue T_{max} sur le coût total de la solution

$\alpha \backslash T_{max}$	0,2	0,3	0,4	0,5
1	1684580	1619222	1621759	1621759
1,25	1975469	1971502	2035737	1975342
1,5	2463680	2394439	2394781	2392318
1,75	2891269	2796361	2815433	2815433
2	3519565	3446098	3375698	3445771

Comme le montre le tableau 3.3.10, nous pouvons voir que pour une valeur fixe de T_{max} , l'impact de α est important sur la fonction objective. Cet impact est attendu puisque le paramètre α qui décrit la proportionnalité entre l'intensité de la crise et le niveau d'accessibilité de la zone, est impliqué dans le temps de travail des ressources affectées à la zone non évacuée mais aussi dans le temps de travail des ressources d'évacuation. Plus la valeur de α est élevée, plus le temps requis pour visiter les patients ou les évacuer est élevé. Cette analyse de sensibilité montre que ce paramètre est assez critique et mérite une évaluation rigoureuse. Afin de mieux évaluer ce paramètre, nous avons besoin de données historiques liées aux différentes évolutions de la crise et à leurs impacts sur l'accessibilité des zones. Il convient de définir des valeurs de α pour les zones urbaines et rurales.

Concernant l'impact de T_{max} , on peut remarquer que pour une valeur fixe de α , ce paramètre n'a pas d'impact important sur la fonction objectif. En effet, les contraintes (C3.3.13) obligent l'unité du groupe de patients, ce qui signifie que si le groupe de patients est évacué alors tous les patients appartenant au groupe sont évacués, le solveur choisit la meilleure composition de chaque groupe dans chaque période.

Nous remarquons dans le tableau 3.3.11 que cette meilleure composition ne dépend pas uniquement de l'étendue de la zone T_{max} qui contient les groupes de patients. Par exemple, un ensemble des patients ayant le même niveau de risque, et situés à un temps de trajet T_{max} entre eux, peuvent ne pas appartenir au même groupe, mais la meilleure solution est de les décomposer en deux groupes qui recevront deux décisions différentes (certains seront gardés aux domiciles et les autres seront évacués).

On remarque aussi que pour un T_{max} fixe, si α (le facteur d'inaccessibilité) augmente, le nombre maximal de patients par groupe augmente aussi, ce qui signifie que le solveur cherche à mettre le plus de patients dans le même groupe pour éviter les allers retours des ressources (ressources affectées aux domiciles ou ressources d'évacuation).

Table 3.3. 11: Nombre maximal de patients par zone

$\alpha \backslash T_{max}$	0.2	0.3	0.4	0.5
1	2	2	2	2
1.5	3	3	3	3
2	3	3	3	3

Conclusion

Nous avons développé un outil proactif pour soutenir l'HAD en cas de catastrophe. Sur la base de l'évolution des catastrophes naturelles prévisibles telles que les inondations et la neige, nous traitons un partitionnement dynamique basé sur les risques individuels associés aux patients. Le modèle développé dans cet article a la particularité de fournir, en même temps, un plan de soutien à domicile (affectation de ressources multi-périodes) pour les patients à risque faible qui seront gardés à la maison pendant la crise, et un plan d'évacuation (évacuation vers les hôpitaux conventionnels ou temporaires). Un plan d'évacuation doit être soutenu par l'attribution de ressources aux patients qui seront évacués vers des hôpitaux temporaires. L'affectation aux hôpitaux conventionnels et aux hôpitaux temporaires est basée sur la proximité géographique. Le modèle considère les aspects économiques en tenant compte des différents coûts tels que le coût d'emploi des ressources, les coûts d'évacuation mais surtout l'aspect risque puisque nous n'autorisons pas un patient à haut risque à rester à son domicile pendant la catastrophe. Le modèle est basé sur un ensemble de paramètres, et c'est pourquoi une analyse de sensibilité a été réalisée afin d'évaluer l'impact de ces paramètres sur les résultats et de mettre en évidence ceux qui méritent une évaluation rigoureuse comme α . Nous n'avons pas considéré le problème de routage et nous avons choisi d'évaluer la distance séparant les patients appartenant au même groupe. Cette distance peut être régulée et adaptée.