



Optimisation linéaire : support de la gestion de crises

A. Guinet

► To cite this version:

A. Guinet. Optimisation linéaire : support de la gestion de crises. CIGI QUALITA MOSIM 2023, Université du Québec à Trois-Rivières, Jun 2023, Trois Rivières, Québec, Canada. pp.6764. <hal-04154082>

HAL Id: hal-04154082

<https://hal.science/hal-04154082v1>

Submitted on 6 Jul 2023

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

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



Distributed under a Creative Commons CC0 1.0 - Universal - International License

CIGI QUALITA MOSIM 2023

Optimisation linéaire : support de la gestion de crises

ALYN GUINET

Laboratoire DISP - Décision et Information pour les Systèmes de Production, Université de Lyon, INSA Lyon, Univ. Claude Bernard Lyon 1, Univ. Lyon 2, DISP-UR4570, 21 av. Jean Capelle, 69621 Villeurbanne, France, a.guinet@insa-lyon.fr

Résumé – De nos jours, l'accumulation des risques engendrés par l'urbanisation croissante, le changement climatique, le terrorisme, les épidémies ainsi que la forte mobilité des personnes et des biens, a accru le potentiel destructeur de divers types de catastrophes. L'objectif de cette communication est face à cette nouvelle réalité de montrer l'apport potentiel des outils d'un certain nombre de projets menés à bien pour les hôpitaux mais aussi pour la Sécurité Civile ou encore les « Home Affairs » européennes... A cette fin, différents scénarios de catastrophes naturelles ou humaines sont présentés et des modèles d'aide à la décision sont précisés. Ils ont tous en commun le fait d'être basés sur des modèles linéaires et d'utiliser pour leur résolution un solveur du marché. Les problématiques de gestion des risques s'attachent plus particulièrement à la protection des populations mais aussi à la protection des systèmes de soins en tant qu'infrastructures critiques.

Abstract – Today, the accumulation of risks generated by a growing urbanization, the climate change, terrorisms, epidemics as well as the high mobility of people and goods, has increased the destructive potential of various types of disasters. Faced with such reality, the objective of this communication is to show the tool contribution of some projects carried out for hospitals, for Civil Security or for the European "Home Affairs"... To this end, different natural or human disaster scenarios are presented and decision support models are specified. They all have in common the fact of being based on linear models and using a market solver for their resolution. Risk management issues focus more particularly on the protection of populations but also on the protection of healthcare systems as critical infrastructures.

Mots clés - Gestion des risques, Protection des populations, Résilience des réseaux de santé, Optimisation linéaire.

Keywords – Risk management, Protection of populations, Resilience of health networks, Linear programming.

1 INTRODUCTION

Aujourd'hui, l'accumulation des risques engendrés par l'urbanisation croissante, le changement climatique, le terrorisme, les épidémies ainsi que la forte mobilité des personnes et des biens, a accru le potentiel destructeur de divers types de catastrophes. Différents scénarios de sinistres naturels ou humains ont été étudiés et ont donné lieu à la proposition d'organisations, de dimensionnements de ressources matérielles et humaines, et de pratiques dans le cadre des plans blancs des structures d'hospitalisation. Les problématiques sous-jacentes sont plus particulièrement la protection des populations et des infrastructures face soit aux risques naturels (crues, tremblement de terre, pandémie...) soit aux risques humains (pollution, terrorisme, cybercriminalité...). Les réponses à ces problématiques se formulent sous forme d'organisations des ressources de mitigation, de préparation ou de réponse (investissements, plans blanc...) et d'outils de support à la prise de décision avant, pendant et après la crise. Pour ces derniers, la Programmation Linéaire et ses extensions ont toujours supporté nos outils d'aide à la décision de manière efficace (qualité des solutions trouvées) et efficiente (facilité de développement, de résolution et de transfert). Afin d'illustrer notre propos nous allons balayer un certain nombre de scénarios de gestion de crises étudiés dans le cadre de collaborations avec des hôpitaux mais aussi de la Sécurité

Civile sous le parrainage de la Région Auvergne Rhône-Alpes ou des « Home Affairs » européennes.

2 QUELQUES PROBLEMATIQUES FACE AUX RISQUES NATURELS

2.1 Simulation de contremesures face à l'épidémie de Covid-19

Notre communauté fait toujours face à une pandémie, qui nous a conduits à confiner la moitié des habitants de notre planète. Nous avons été désarmés face au coronavirus (SRAS-CoV-2) en mars 2020 et le confinement nous a semblé être la seule contre-mesure apte à endiguer la pandémie malgré le coût économique qui pouvait en résulter.

Le modèle SIR (susceptible-infecté-rétabli) est connu comme un modèle compartimental en épidémiologie. Le modèle SIR, dans sa formulation de base, stratifie la population en trois états : susceptible d'attraper la maladie (notée S), infectée par la maladie (notée I) et rétablie de la maladie (notée R). Dans de nombreux cas de la littérature, les personnes infectées sont détaillées en plusieurs états supplémentaires : latent c'est-à-dire sans symptômes, prodromal c'est-à-dire avec symptômes et fulminant c'est-à-dire dans un état sévère voire détérioré [Guinet et al., 2018 ; Perra et Gonçalves, 2015]. Afin de simuler l'épidémie et d'étudier l'impact de contremesures potentielles, nous avons utilisé le modèle SIR comme un modèle de flux, en calculant par période les nombres de personnes d'une population donnée aux différents stades de la

maladie et/ou sous différents traitements médicaux, et en propageant les flux de personnes entre les états pour chaque période. Nous utilisons une représentation discrète du modèle SIR sur un horizon de périodes journalières. Lorsque la maladie n'est pas humainement transmissible comme pour un empoisonnement [Guinet et al., 2018, Chen et al., 2016] ou lorsque le taux d'infection est constant pour toute une population (grippe saisonnière), le modèle SIR peut être linéarisé [Guinet et al. 2018 ; Liu et al., 2019]. Le taux de transmission de S à I est supposé constant et la propagation du flux de S vers I peut être approximée en fonction de S.

Notre modèle épidémiologique a été le bateau de croisière Diamond Princess. Les passagers ont été infecté par un cas unique de Covid-19, ils ont tous été testés pour le virus et tous les malades symptomatiques et asymptomatiques étaient connus [Mizumoto et Chowell, 2020 ; Rocklöv et al., 2020]. Dans ce cluster, la population vivant sur le navire était bien sûr plus homogène, par rapport à la population plus disparate de Wuhan ou de la France. Grâce à Rocklöv et al. [2020], le nombre de reproduction de base R_0 de la maladie était disponible avant et après confinement des passagers. Une succession de taux de reproduction R_i était donc connue et permettait une approche échelonnée.

Notre modèle est celui de la figure 1. Un individu apparaît d'abord dans l'état susceptible (S). Il passe à l'état infecté s'il acquiert la maladie (I). Si des symptômes apparaissent, il atteint l'état prodromal (P). Si des traitements sont disponibles, il reçoit un traitement de première intention à l'hôpital (T). En l'absence de traitement ou si le traitement échoue, le patient passe à l'état fulminant (F). Ensuite, il peut être admis dans un lit de soins intensifs disponible (C). Enfin, soit il est guéri (R) après une hospitalisation en médecine post-soins intensifs (H), soit il décède (D).

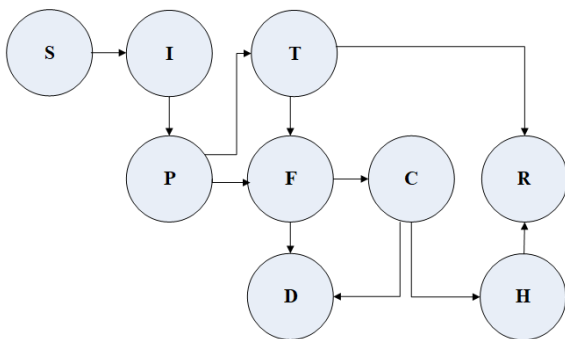


Figure 1. Le modèle compartimental

Un modèle linéaire [Guinet, 2022] disponible sur demande, a été proposé à des fins de simulation. Il intègre la succession des états de la population face à la maladie dans le modèle compartimental ci-dessus sur un horizon de 180 jours, un nombre limité de traitements de première intention, un nombre réduit de lits d'hospitalisation ainsi qu'un nombre restreint de lits de réanimation. Le modèle tient compte d'une durée de contagiosité et d'une durée d'incubation de la maladie, de durées d'hospitalisation... Les coûts des réponses médicales sont minimisés, c.-à-d. le coût d'indemnisation potentielle des personnes décédées, le coût des traitements de première intention, le coût des soins intensifs et d'hospitalisation médicale. Le coût d'indemnisation étant au moins dix fois plus élevé que les autres coûts, la minimisation du nombre de décès est le critère majeur.

Nous avons étudié la période du 23 février au 23 mai 2020, soit un horizon de 90 jours [Guinet, 2022]. Les problèmes sont

résolus avec le solveur Cplex (<https://www-01.ibm.com/software/commerce/optimization/cplex-optimizer/>). Les paramètres du modèle sont définis dans une feuille Excel et les résultats sont écrits dans une autre feuille Excel. Des contre-mesures de confinement versus l'efficacité de possibles traitements de première intention proposés à l'époque ont été simulées. Concernant les victimes, nos résultats se rapprochent assez bien de la réalité que nous avons bien tristement connue. Un traitement efficace de première ligne a semblé être la meilleure contre-mesure pour lutter contre la pandémie de Covid-19 mais il n'existait pas, ceci en diminuant drastiquement le nombre de morts c'est-à-dire en le divisant par 5. Cependant, le confinement des habitants a été aussi une contre-mesure simple et efficace pour réduire par 2 le nombre de victimes. Concernant l'utilisation des lits de soins intensifs, un traitement efficace de première intention s'est avéré une contre-mesure efficace pour réduire par 3 l'intensité d'utilisation de ces ressources médicales. Les temps de calcul étaient d'environ 3 secondes pour chaque scénario de contremesures. Le modèle s'avère globalement fidèle à la réalité, il renseigne sur les besoins en ressources hospitalières bien que ceux-ci soient lissés en raison des hypothèses de linéarité. Il permet tout de même d'anticiper afin d'être plus résilient par le biais des actions de mitigation étudiées. Utilisé comme outil d'aide à la décision, ce modèle de simulations de contremesures permet d'évaluer l'impact d'une pandémie et de choisir parmi les contremesures étudiées, celles les mieux adaptées. Des investissements en termes de recherches médicales, de campagnes vaccinales de prévention, de stocks stratégiques de médicaments peuvent alors être décidés.

2.2 Evacuation ou maintien à domicile face à une crue de grande ampleur

Les catastrophes hydrologiques, déclenchées par une inondation ou une coulée de boue, entraînent de lourdes pertes en vies humaines et en dommages de bâtis. Selon Guha-Sapir et al. [2012] elles font partie des catastrophes les plus graves à travers le monde. A l'époque, les articles étudiant l'évacuation d'urgence étaient nombreux, mais ceux portant sur l'évacuation des hôpitaux étaient rares. Un seul article a été trouvé à l'époque pour la gestion des soins à domicile en situation de crise [Rest et Hirsch, 2015] mais il abordait la planification des patients à évacuer pas la décision d'évacuation. Compte tenu de notre recherche bibliographique, un modèle d'optimisation nous a semblé le plus adapté pour anticiper et coordonner l'évacuation des patients d'une structure de soins à domicile connaissant le déroulé de la crue.

Face à une catastrophe naturelle telle une crue, le fonctionnement d'une structure d'Hospitalisation A Domicile (HAD) se trouve fortement perturbé, car l'activité principale qui consiste à délivrer des soins au domicile des patients est compromise. Plus précisément les visites infirmiers, les livraisons de médicaments, les consultations médicales sont dépendantes de l'accès au domicile des patients et se voient annulées ou reportées. La décision majeure que les gestionnaires doivent prendre afin de sécuriser leurs patients est l'évacuation ou le maintien à domicile en adaptant la délivrance des soins. L'évacuation peut être faite vers un hôpital conventionnel ou un lieu d'hébergement éphémère ou encore le domicile d'un proche. Les hôpitaux ayant des capacités d'accueil limitées, ils ne peuvent faire face à des afflux massifs sur toute la durée de la crise. La solution consiste alors à établir des lieux d'hébergement éphémères (hôpital temporaire).

Le scénario qui a été bâti puis étudié à partir des éléments de la

Préfecture du Rhône [IRSI-PP, 2008] et en concertation avec les élus, était le suivant. Au mois de janvier, une crue bouleverse Lyon par sa soudaineté, causant d'immenses dégâts matériels. En cette fin de mois de janvier, la pluie tombe sans discontinuer. La saturation des nappes souterraines gorgées d'eau après un été et un automne très pluvieux, accélère la fulgurante montée des eaux. Le 25 janvier, le Rhône est à 3,80 mètres. 6 jours plus tard, il est à 7,39 mètres. Le débit d'eau du Rhône est multiplié par huit. L'eau s'engouffre partout, la place Bellecour est recouverte jusqu'à la hauteur de 1,30 mètre, le métro et le tramway sont hors d'usage. Les 2ème, 3ème, 6ème et 7ème arrondissements sont partiellement sous les eaux, 600 maisons s'écroulent. Le 31 janvier, le pic est atteint : 9,72 mètres. La montée des eaux s'étant faite en une dizaine de jours, la décrue prendra environ 20 jours.

Le processus d'évacuation des patients acheminés vers un lieu d'hébergement éphémère (un gymnase), comporte : le tri des patients par destination (hôpital, domicile des proches, lieu d'hébergement éphémère), le transport des patients évacués ou les recommandations d'évacuation pour les proches récupérant directement un patient, l'utilisation d'une chaîne de décontamination fixe ou mobile (d'un hôpital, du SDIS, de l'Armée) si besoin, l'installation d'une ou plusieurs structures d'hébergement temporaire (lieu, personnels, matériels...), le fonctionnement d'une ou des structures d'hébergement temporaire (personnels salariés et libéraux, consommables...). L'hébergement éphémère sera choisi en dernier recours si un placement hospitalier ou chez des proches du patient n'est pas possible. C'est une solution ultime en raison de son coût.

Dans le cadre du Projet PrHoDom (Protection de l'Hospitalisation à Domicile) financé par la Région AURA, nous avons développé un modèle linéaire mixte multi-période [Guinet et al., 2017] pour l'affectation des différents types de ressources humaines et matérielles et le choix de la décision du maintien ou de l'évacuation des patients par zones (9 arrondissements). Sous l'hypothèse que le déroulé du scénario de la crue soit connu, notre modèle propose l'évacuation des patients par arrondissement tout au long de la durée de montée de la crue (15 jours) compte tenu des ressources disponibles en temps médecins et infirmiers, des lits d'hospitalisation permanents ou éphémères... Des coûts d'emploi des ressources à domicile, d'hospitalisation et d'évacuation sont considérés. Le modèle résolu à l'aide du solveur Cplex a proposé l'évacuation des patients d'un arrondissement durant la montée de la crue pour le scénario proposé. Outre les patients à évacuer, notre modèle disponible sur demande [Guinet et al., 2017] précise par ses variables l'intensité des visites infirmiers et des visites médecins durant le déroulé de la crue, indicateurs suivis entre autres pour le déclenchement d'un plan blanc dans le cadre de la réponse au sinistre. Un modèle plus fin au niveau de la localisation des patients et des centres d'hébergement a été développé suivant une approche similaire [Barkaoui et al., 2018] afin de mieux connaître les besoins infirmiers et hospitaliers. Nos modèles aident les acteurs de la cellule de crise à anticiper les décisions auxquelles ils vont être confrontés tout au long de la crise, en particulier au niveau du déclenchement des plans d'urgence.

3 QUELQUES PROBLEMATIQUES FACE AUX RISQUES HUMAINS

3.1 Afflux massif de patients dans le cadre d'un plan blanc

La prise en charge des patients en sortie anticipée des hôpitaux vers des structures HAD en raison d'un afflux massif de

victimes suite à un acte terroriste et ceci afin de libérer des lits d'hospitalisation, nécessite d'être planifiée en raison de la capacité limitée de prise en charge des HAD sous la contrainte de ne pas perturber la continuité des soins des patients déjà présents dans l'HAD. Peu de littérature avait été trouvée à l'époque sur la planification des admissions en milieu hospitalier, si ce n'est quelques comparaisons avec des centrales de réservation hôtelière. Dans notre contexte d'admissions massives, nous ne sommes pas face à des admissions programmées et le tri des victimes vers des structures existantes est la seule solution référencée dans cette situation d'urgence [Lax et Prior, 2018].

La planification des activités à mettre en œuvre nécessite la maîtrise des ressources humaines et matérielles ainsi qu'informationnelles (ordonnances de soins et de médicaments). Elle doit permettre de coordonner les différents effecteurs internes et externes à la HAD en précisant à minima par période (heure) les flux de patients entrant. Les flux de patients doivent être précisés par activité et par période afin de vérifier leur faisabilité vis-à-vis de la disponibilité des ressources, de gérer le personnel et les sous-traitants et d'anticiper les livraisons de service (locations de matériels, prestations de transport...) et de médicaments (à partir d'une pharmacie à usage interne ou de pharmacies d'officine).

Un outil d'aide à la planification a été développé dans ce sens [Guinet et Dubost, 2019], il précise par activité et par période le nombre de patients à traiter et en attente de traitement compte tenu des ressources humaines et matérielles disponibles. L'ordre de passage par les différentes activités définit le cheminement du patient ou du dossier patient. L'objectif recherché est l'efficacité du processus c'est-à-dire la planification au plus tôt de l'ensemble des patients à admettre. Les activités d'admission en HAD sont : l'établissement de l'ordonnance de soins par le médecin coordonnateur de l'HAD et le médecin hospitalier, l'établissement de l'ordonnance de médicaments par le pharmacien de l'HAD et le médecin hospitalier, l'affectation de l'infirmier libéral pour les soins, la préparation de la livraison des médicaments en pharmacie à usage interne, la livraison des médicaments et du matériel médical (lit médicalisé, pousse-seringue, ventilateur mécanique...), le transport du patient en ambulance, l'entrée du patient à son domicile et l'information de l'aidant (membre de la famille, ami ou voisin). Les ressources humaines de l'HAD associées aux activités d'admission sont : les médecins coordonnateurs, les pharmaciens, les infirmiers libéraux, les préparateurs en pharmacie, les livreurs et les ambulanciers.

Le scénario étudié en anticipation de la Finale Europa League de 2018, était le suivant. Une attaque terroriste a été perpétrée au Parc OL (stade de l'Olympique Lyonnais). Les terroristes ont pu entrer dans le stade grâce à des complicités et prendre leur place au milieu de la foule des spectateurs malgré les contrôles de sécurité renforcés à l'entrée. Au cours du jeu, ils ont décidé de passer à l'acte et se sont fait exploser au milieu du public. Les dégâts matériels mais surtout humains sont catastrophiques. Les premiers bilans parlent de 40 morts et de 150 blessés. Les victimes ont été répartis sur les hôpitaux de la région qui sont habilités à recevoir des victimes de guerre (HEH, Tonkin, St Joseph st Luc, Desgnettes, Lyon sud). Le plan VIGIPIRATE départemental a été activé ainsi que le plan ORSEC NoVi (Nombreuses victimes). Contraints par leurs capacités d'accueil, les hôpitaux doivent évacuer les patients convalescents et dont les prises en charge ne nécessitent pas ou plus un plateau technique vers les HAD de la région. Dans la cadre d'un plan blanc élargi établi par les Hospices Civils de Lyon et l'HAD Soins et Santé, cette dernière a accepté de

recevoir 100 patients en sortie anticipée des HCL afin de permettre à celle-ci de libérer des lits pour accueillir les victimes au plus tôt. Les patients en sortie anticipée doivent être évacués vers leur domicile (lieu d'hospitalisation) où ils seront pris en charge par l'HAD.

L'outil de planification développé pour la structure HAD dans le cadre du Projet PrHoDom (Protection de l'Hospitalisation à Domicile) financé par la Région AURA, est basé sur un programme linéaire mixte bi-objectifs (c.-à-d. admettre au plus tôt les patients en minimisant le nombre de ressources humaines employées). Un problème d'ordonnancement multi-projet sous contraintes de ressources a été défini et résolu par une approche lexicographique à l'aide du solveur Cplex. Une solution optimale est trouvée dans la grande majorité des cas en optimisant en priorité l'admission au plus tôt des patients. L'outil conçu initialement dans le cadre de la discussion entre les Hospices Civils de Lyon et la Structure d'hospitalisation à domicile Soins et Santé, afin d'apprécier le nombre maximum de patients pouvant être accueillis en sortie anticipée, renseigne par ses variables sur l'intensité d'emploi des ressources humaines (médecins, infirmiers, préparateurs en pharmacie) et matérielles (livraison des médicaments, transport des patients). Il est disponible sur demande [Guinet et Dubost, 2019], il permet de préparer l'accueil des entrants en préservant la continuité des soins et ainsi de répondre à l'afflux massif. La pandémie de Covid-19 a permis indirectement de vérifier la justesse des résultats de l'outil car une centaine de sorties anticipées ont été prises en charge par la structure HAD afin de libérer des lits d'hospitalisation durant cette crise.

3.2 Cloisonnement du système d'information face à des cyberattaques

En août 2014, le projet Threats (Terrorist attacks on Hospital: Risk and Emergency Assessment, Tools & Systems) financé par le programme européen CIPS débutait, il avait pour objectif de proposer une approche et des outils de support pour améliorer la résilience des hôpitaux face à la menace terroriste. Durant le même mois, un hôpital associé à ce projet subissait une cyber-attaque qui paralysa principalement le service des urgences, le bloc opératoire et les préparations magistrales de chimiothérapie pendant une dizaine de jours. Un système de continuité de l'activité conçu par notre groupe de gestion de crises et organisé à partir d'un système papier de sauvegarde et de gestion de l'information, permit de limiter la perte d'activité de l'hôpital [Grange et Leynon, 2016]. Suite à cette attaque une partie du projet c'est naturellement focalisé sur les cyberattaques afin de protéger de manière plus efficace le système d'information hospitalier. Faire face à la cybercriminalité et au cyber-terrorisme, pose une problématique de protection de l'information. Les objectifs recherchés par les pirates peuvent être l'expression de revendications, l'extorsion de fonds, le sabotage, le meurtre de patients... Le plan de sécurisation de l'établissement (PSE) doit à minima mettre en œuvre en préventif un processus de sécurisation des postes de travail, de cloisonnement physique de sous-systèmes d'information et de gestion du nomadisme. A l'encontre du plan blanc qui est déclenché une fois le sinistre observé, le PSE d'un hôpital nécessite un fonctionnement routinier afin de faire face à des sinistres majoritairement anonymes. Il est sous la houlette du responsable de la sécurité informatique. Nous limiterons notre propos au processus de cloisonnement, non sans avoir présenté l'approche qui le justifie.

L'approche préconisée par le projet Threats (projet CIPS 5056 financé par la Communauté Européenne [lab.fr/\) adaptée à notre contexte, s'établit comme suit. Nous identifions tout d'abord les sources de menaces à partir des données connues sur les cyberattaques, nous spécifions le profil de l'adversaire, ses actions potentielles, ses capacités et sa motivation. Nous repérons parallèlement les actifs critiques au regard de leur usage du système d'information, c'est-à-dire les unités qui sont les plus dommageables face à la perte d'information et face à la production de valeur ajoutée. Un modèle IDEF0 \[1993\] nous permet de cartographier ces actifs critiques et leurs échanges \(figure 2\). Nous calculons ensuite l'attractivité des actifs critiques pour chaque source de menace, afin d'identifier les vulnérabilités potentielles. Sur la base de l'attractivité des actifs critiques par adversaire, les scénarios d'attaque les plus probables \(c'est-à-dire la cible la plus facile pour l'adversaire le plus motivé\) induisant les plus importantes conséquences sont construits. Les scénarios sont alors étudiés pour proposer la mise en place d'éventuelles contre-mesures afin de réduire le risque à un niveau acceptable.](https://threats.disp-</p></div><div data-bbox=)

Le processus de cloisonnement est une de ces contremesures préconisées par l'Agence Nationale de la Sécurité des Systèmes d'Information [ANSSI, 2013] à l'époque. Il doit physiquement séparer les données sensibles internes (médicales) des données extérieures, c.-à-d. autoriser uniquement des mises à jour sécurisées et interdire des possibilités d'accès internes et externes sur un même poste de travail. Les locaux hébergeant les serveurs doivent être sécurisés et leurs accès contrôlés. Le cloisonnement physique du système d'information en sous-systèmes étanches minimise la vulnérabilité de celui-ci en obligeant le pirate à accéder séparément à plusieurs sous-systèmes géographiquement dispersés et minimise ainsi les conséquences des infections entre sous-systèmes en l'absence de transmissions possibles entre eux.

Notre approche Threats [Guinet, 2017] nous permet d'obtenir un modèle statique de l'infrastructure construit à l'aide de la méthodologie IDEF0 [1993], identifiant les différentes zones (clients du système d'information) d'un hôpital et les partages d'informations entre ces dernières. Ce modèle permet de construire un graphe cartographiant les liaisons numériques entre serveurs et postes de travail du système physique d'information. Un calcul de composantes fortement connexes sur ce graphe binaire permet de définir les sous-systèmes à isoler en priorité dans l'organisation. Les liaisons entre postes de travail et serveurs à supprimer pour cloisonner le système n'étant pas toutes de même importance, une problématique de partitionnement se pose alors de manière plus précise.

On doit donc rechercher un ensemble de partitions (sous-systèmes) d'un système d'information sachant que les éléments des partitions peuvent échanger de l'information entre eux mais que les partitions n'en échangent pas à priori entre elles. Une fois le cloisonnement physique mis en place, les partitions pourront toutefois échanger des informations entre elles mais par des supports extérieurs tels des saisies manuelles, des codes-barres cryptés, voire des clefs USB cryptés dont l'origine est certifiée. Plus de liaisons numériques sont conservées, plus le nombre de partitions est petit et plus le coût résultant d'une attaque non déjouée est important. Plus de liaisons numériques sont supprimées, plus le nombre de partitions est grand et plus le coût résultant d'une attaque non déjouée est faible. Les critères coûts des liaisons numériques perdues et coût de l'attaque d'une partition, sont inversement dépendants l'un de l'autre et sont à optimiser. Un programme linéaire mixte permet de calculer les partitions suivant ces principes. L'objectif recherché est la minimisation d'une part des coûts économiques des liaisons numériques supprimées

entre partitions et remplacées par des saisies manuelles et d'autre part du coût économique d'une attaque portant sur une seule partition quelle qu'elle soit. Dans le cadre de notre hôpital, l'emploi de Cplex nous a permis de suggérer 6 partitions étanches : réservation/admissions et services de soins, urgences, soins intensifs, pharmacie, stérilisation et patients sachant que les services généraux formaient une partition indépendante à l'origine. Si l'on considère la perte d'activité consécutive à la cyberattaque, à savoir la fermeture des urgences durant 2 semaines, l'interruption de la production des chimiothérapies magistrales, et le report de plusieurs dizaines d'interventions en bloc opératoire, la partition proposée semble tout à fait justifiée et constitue une bonne mesure de mitigation. Pour les soins intensifs, la faiblesse des systèmes SCADA de surveillance des patients sous assistance médicale a justifié leur isolement informationnel [Venkateswarlu, 2014]. L'outil d'aide à la décision proposé par notre équipe [Guinet, 2017] et disponible sur demande, a permis de redéfinir l'architecture fonctionnelle du système d'information hospitalier afin de mieux prévenir les conséquences de toute cyberattaque.

4 CONCLUSION

Ces douze dernières années nous ont montrées la triste réalité des sinistres d'origines naturelle ou humaine. Les attaques terroristes, les intoxications alimentaires pour les petits et les grands, les crues méditerranéennes, la pandémie de COVID-19..., ont mis à mal la résilience des populations. Le temps n'est plus de découvrir les problèmes mais de trouver des

solutions pérennes. Nous avons travaillé sur certaines d'entre elles avec les décideurs d'infrastructures critiques (majoritairement des hôpitaux) et nous avons proposé grâce à l'Europe et la Région AURA des outils de terrain simples de conception et d'usage à destination des cellules de crise, si l'on ne s'attache pas à la recherche du détail qui est souvent très volatil dans de telles situations. Les modèles de programmation linéaire ont su dans ce cadre démontrer leur efficacité en reproduisant de manière très correcte la réalité du terrain et leur efficacité par une investigation scientifique majoritairement en modélisation et un support d'exécution de modèles de qualité, à savoir Cplex. Nous n'avons pas inclus dans cette communication le détail des modèles mathématiques que le lecteur pourra trouver dans les articles référencés, ceci afin de prendre un peu de recul vis-à-vis de nos investigations.

5 REMERCIEMENTS

Actuellement à la retraite mais non rayé des cadres, je tiens à remercier les personnes avec qui j'ai travaillé durant ces douze dernières années sur les différentes problématiques de gestion des risques, dans le cadre tout d'abord du groupe de gestion de crises de l'hôpital Saint-Joseph/Saint-Luc et des Hospices Civils de Lyon, puis de la direction de l'établissement d'hospitalisation à domicile Soins et Santé de Rillieux la Pape. Mes remerciements s'adressent plus particulièrement au Dr Sylvie Meyran et à Mireille Lardière mais avant tout aux Dr. Eric Dubost et au Dr. Denis Graveriau qui malheureusement ne sont plus là.

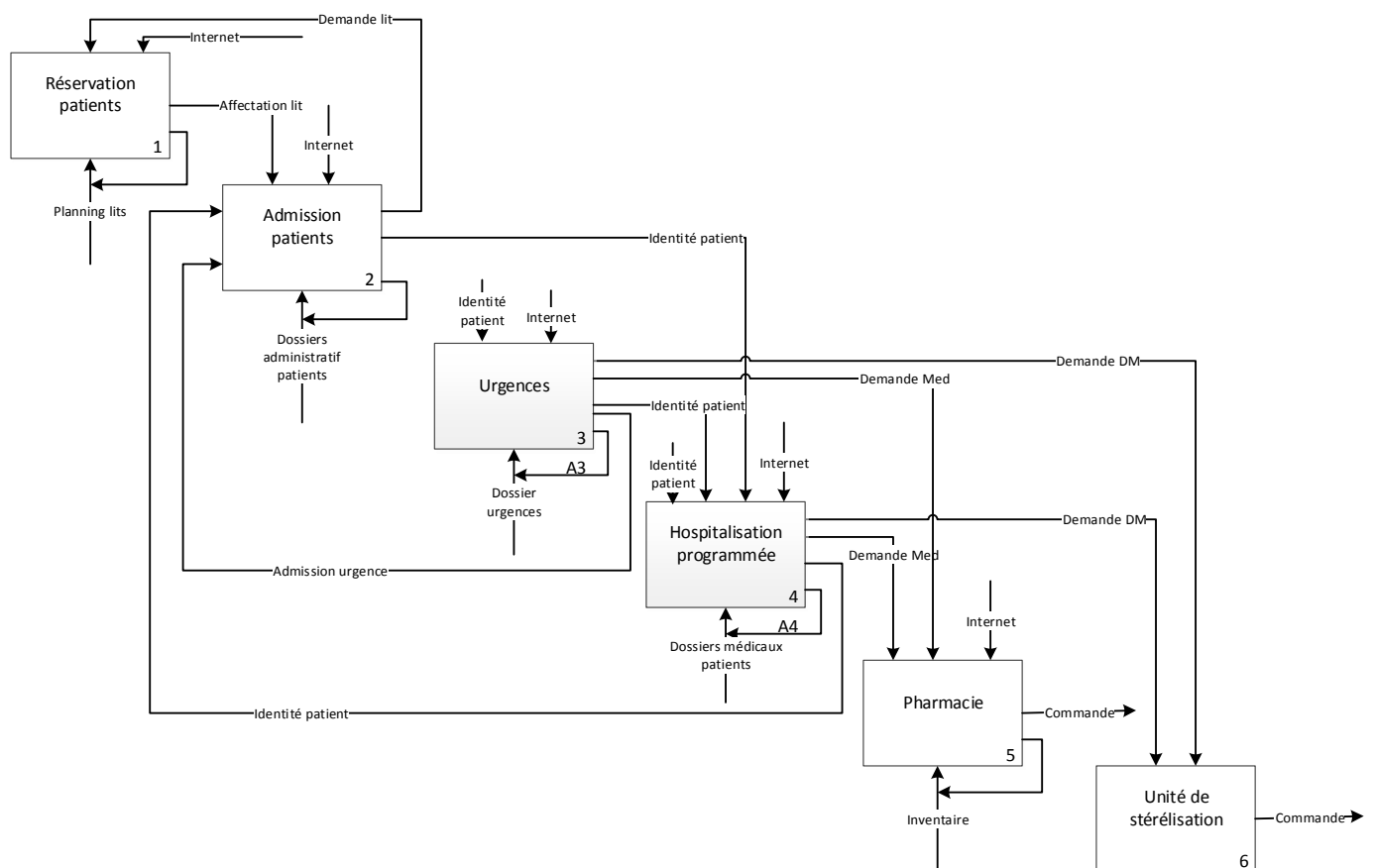


Figure 2. Extrait de la cartographie des actifs critiques

6 REFERENCES

- Guinet, A., Barkaoui, H., Wang, T., & Dubost, E. (2018). An Emergency Management Plan to Face a Foodborne Criminal Attack. *ILS 2018 - International Conference on Information Systems*, Lyon, (France), SCOPUS, <https://jeannicod.ccsd.cnrs.fr/UNIV-LYON2/hal-01895901v1>.
- Perra, N., & Gonçalves, B. (2015). Modeling and predicting human infectious diseases. In *Social Phenomena*, Gonçalves, B. and Perra, N. (eds). Springer, Cham.
- Chen, W., Guinet, A., & Ruiz, A. (2016). Modeling the Logistics Response to a Bioterrorist Anthrax Attack. *European Journal of Operational Research*, 254, 458-471.
- Liu, M., Xu, X., Cao, J., & Zhang, D. (2019). Integrated planning for public health emergencies: A modified model for controlling H1N1 pandemic. *Journal of the Operational Research Society*, 71(5), 748-761.
- Mizumoto, K., & Chowell, G. (2020). Transmission potential of the novel coronavirus (COVID-19) onboard the Diamond Princess cruise ship. *Infectious Disease Modelling*, 5, 264–270.
- Rocklöv, J., Sjödin, H., & Wilder-Smith, A. (2020). COVID-19 outbreak on the Diamond Princess cruise ship: Estimating the epidemic potential and effectiveness of public health countermeasures. *Journal of Travel Medicine*, 27, 1–7.
- Guinet, A. (2022). Simulation of Countermeasures in the Face of Covid-19 Using a Linear Compartmental Model. *Healthcare Systems Challenges and Opportunities*, ISTE (Wiley), 61-70.
- Guha-Sapir, D., Vos, F., Below, R., & Ponserre, S. (2012). *Annual Disaster Statistical Review 2011: The Numbers and Trends*. Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED), Brussels.
- Rest, K.D., & Hirsch, P. (2015). Supporting Urban Home Health Care in Daily Business and Times of Disasters. *IFAC-Papers Online*, 48(3), 686–691.
- IRSI-PP. (2008). Institut de Recherche Stratégique International pour la Protection des Populations. <https://assoce.fr/waldec/W691072213/INSTITUT-DE-RECHERCHES-STRAT-GIQUES-INTERNATIONALES-POUR-LA-PROTECTION-DES-POPULATIONS-IRSI-PP->
- Guinet, A., Barkaoui, H., & Wang, T. (2017). A mitigation tool to protect a home health care structure facing a hydrological disaster. *IFAC 2017 World Congress, Toulouse (France)*. *IFAC-PapersOnLine*, 50(1), 4630-4635.
- Barkaoui, H., Guinet, A., & Wang, T. (2018). Securing Home Health Care structures facing forecastable natural disasters: A new tool to regulate between evacuation and adaptive home support services. *16th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing INCOM 2018*, Bergamo (Italy), 51(11), 986-991.
- Lax, P., & Prior, K. (2018). Major incident pre-hospital care. *Surgery*, 36, 402-408.
- Guinet, A., & Dubost, E. (2019). Mass casualty events: a decision making tool for home health care to discharge conventional hospitals. *Fourth International Conference on Health Care Systems Engineering (HCSE 2019)*, May, Montréal, Canada.
- Grange, H., & Leynon, J. (2016). Crisis Management Plan: Preventive Measures and Lessons Learned from a Major Computer System Failure. *Health Care Systems Engineering for Scientists and Practitioners, Springer Proceedings in Mathematics & Statistics*, ISBN: 978-3-319-35130-8, 203-214.
- IDEF0, (1993). Integration Definition for Function Modelling (IDEF0). *Draft Federal Information Processing Standards Publication*, <http://www.idef.com/Downloads/pdf/idef0.pdf>.
- ANSSI (2013). Guide d'hygiène informatique, <https://www.ssi.gouv.fr/administration/guide/guide-dhygiene-informatique/>
- Guinet, A. (2017). How to protect a hospital against cyber-attacks. *Third International Conference on Health Care Systems Engineering*, May, Florence (Italy). *Springer Proceedings in Mathematics & Statistics*, 210, 3-16.
- Venkateswarlu, G. (2014). Expert and SCADA based centralized patient monitoring and escorting system. *International Journal of Advanced Research in Electrical Electronics and Instrumentation Engineering*, 3, 13089-13098.