

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université de Bordj Bou Arreridj



# Thèse de Doctorat

Présentée à la faculté des Mathématiques et d'Informatique  
Département d'Informatique

Pour l'obtention du Diplôme de Formation Troisième Cycle  
**Doctorat LMD**

## Spécialité

Informatique Distribuée et Informatique Décisionnelle

## Thème

---

# La Simulation Prescriptive de Sécurisation : Application à la Gestion des Infrastructures Critiques

---

Par

**ATTIA Safa**

Soutenue publiquement le : 18 Juin 2017

Devant le jury composé de :

M. Laskri Mohamed Tayeb	Professeur à l'université de Annaba	Président
M. Kazar Okba	Professeur à l'université de Biskra	Examineur
M. Touahria Mohamed	Professeur à l'université de Sétif	Examineur
M. Akhrouf Samir	Maître de conférences A à l'université de BBA	Examineur
M. Boubetra Abdelhak	Professeur à l'université de BBA	Rapporteur

Année : 2016/2017

*A ma douce mère  
A mon très cher père  
A mes frères et mes sœurs  
A toute ma famille et mes amis  
A mes professeurs et mes collègues.*

# Remerciements

Avant tout, je tiens à remercier et exprimer ma profonde gratitude envers le bon dieu tout puissant : son amour, sa miséricorde et ses grâces à mon endroit m'ont fortifié dans la persévérance et l'ardeur au travail.

L'aboutissement de cette thèse a été contribué grâce au concours de plusieurs personnes, à travers leur amour, leur amitié et leur appui et à qui je voudrais témoigner toute ma reconnaissance.

J'exprime mes vif remerciements et ma profonde gratitude à mon encadreur **Pr. BOUBETRA Abdelhak**, professeur à l'université de Bordj Bou Arréridj, de m'avoir proposé ce thème de recherche et de son enthousiasme afin de me guider durant la réalisation de ce projet. Je lui serai toujours reconnaissante d'avoir guidé mes premiers pas de recherche.

Tout mon respect, mes remerciements et ma gratitude à tous les membres de jury, chacun en son nom et sa qualité, d'avoir accepté d'expertiser mon travail et d'être dans le jury de ma soutenance : **Pr. KAZAR Okba**, professeur à l'université de Biskra, **Pr. TOUAHRIA Mohamed** professeur à l'université de Sétif, **Dr. AKHROUF Samir**, docteur à l'université de Bordj Bou Arréridj et plus particulièrement au **Pr. LASKRI Mohamed Tayeb**, professeur à l'université de Annaba pour avoir assuré en plus le rôle de président de jury. Je tiens à les remercier tous de m'avoir honoré par leur participation à l'évaluation de mon travail de Doctorat.

Je tiens à exprimer mon profond respect à mon enseignant **Dr. AKHROUF Samir**, de m'avoir accordé tant de confiance et de m'avoir encouragé à partir de son aide et sa disponibilité tout au long de mes années d'études universitaires. Dieu seul peut le récompenser pour un tel exploit.

Je souhaiterais aussi exprimer mes remerciements à **Dr. ATIA Salim**, maitre de conférences classe B à l'université de Bordj Bou Arréridj, qui m'a donné un magnifique modèle de labeur et de persévérance et qui m'a beaucoup aidé par ses valeureux conseils et ses critiques constructives que je mets toujours devant mes yeux.

Ma gratitude s'adresse à **Mr. BOUKHALFA Baymout**, enseignant et directeur à l'école d'anglais PINPOINT à Bordj Bou Arréridj, de m'avoir suivi et enseigné tout au long de ma formation en langue anglaise.

J'adresse mes sincères remerciements au personnel de *l'hôpital BOUZIDI Lakhdar* (médecins, infirmières et agents administratifs) qui ont eu la gentillesse de bien vouloir m'accorder de leur précieux temps pour participer dans la réalisation de ce travail en mettant à ma disposition leurs connaissances et leurs documents.

Ma gratitude s'adresse à tous les enseignants qui ont assuré ma formation du primaire jusqu'à l'université. Je souhaiterais aussi exprimer mes remerciements à mes collègues de la formation doctorale IDID, pour leur soutien et leur dévouement et surtout pour l'ambiance amicale et conviviale qu'on a vécue ensemble et en particulier à l'amie la plus chère à mon cœur Manel.

J'exprime ma profonde reconnaissance à l'ensemble du personnel de la faculté des mathématiques et d'informatique de l'université de Bordj Bou Arréridj : enseignants, secrétaires et agents ainsi qu'à tous les étudiants que j'ai enseignés.

Finalement, je ne peux qu'être infiniment reconnaissante envers mes très chers parents **Chikouche Hayet & Atia Salim** pour leur amour inestimable, leur soutien indescriptible, leur confiance et leur patience. Ce travail est le fruit de leurs sacrifices qu'ils ont consentis pour mon éducation et ma formation. Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que je porte pour eux, très fière d'être leur fille. Je leur dédie avec plaisir cette thèse ainsi qu'à mes frères Mohamed & Nour El Islem, mes sœurs Nassima & Douaa, toute ma famille et mes amis qui ont été toujours présents lorsque j'en ai besoin.

Merci à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail !



*“Have the courage to follow your heart and intuition.  
They somehow already know what you truly want to  
become. Everything else is secondary.”*

*Steve Jobs*

## ملخص

ظهور عدد كبير من نقاط الضعف وزيادة الترابط بين الأنشطة الاقتصادية والاجتماعية وضعت الشبكات الحيوية في وضع دقيق للغاية. هذه الشبكات تمثل البنى التحتية الحساسة حيث أنّ سلامة وأمن كل واحدة منهن يعتمد على الاخريات. كلما كانت هذه البنى أكثر ترابطاً، كلما أدى فشل أو تعطل إحداهن إلى عواقب كارثية على جميع البنى المرتبطة بها. من أجل تسيير وحماية هذه البنى التحتية المترابطة والتقليل من هشاشتها، عديد المشاريع والدراسات العلمية تم القيام بها وإنجازها. يهدف بحثنا العلمي هذا أساساً إلى دراسة المشكلة من وقوع انقطاع للكهرباء في البنى التحتية للمستشفيات وتقديم حلول استباقية على شكل قرارات تتخذ وتقدم إلى الجهات المعنية في الإدارة والتدخل في مثل هذه الحالات الحرجة. لهذا، اقترحنا نظام مساعد لإدارة الطوارئ الذي تمت نمجته من خلال خلق سيناريوهات محاكاة توجيهية وقابلة للتكيف. ونفذنا هذا النظام من خلال إنشاء تطبيق ويب يعمل على الأجهزة المحمولة. هذا الأخير، يسمح من خلال الفوائد التي يمكن أن يقدمها، من تسهيل مهام المصالح المعنية، وتحسين نوعية الاتصالات للتقليل من الوقت اللازم للإخلاء، وبالتالي الحد من نطاق الضرر الحاصل.

## الكلمات المفتاحية

حماية البنى التحتية، مشكل الترابط، تعطل الشبكة الكهربائية، البنية الاستشفائية، نظام داعم للتسيير، سيناريوهات توجيهية، المحاكاة، تطبيق إلكتروني محمول.

# Abstract

The emergence of a large number of vulnerabilities and the growing interdependence of economic and social activities put vital networks in a particularly delicate situation. These networks constitute the critical infrastructures of which the safety and the security of one of them depends on the others. Being more and more interdependent, their failure can have catastrophic consequences on the whole. In order to manage and protect these infrastructures and reduce their vulnerabilities, several works to protect them have developed. The main objective of our research aims to study the problem of the occurrence of an electrical failure in the hospital infrastructures and to provide anticipatory solutions as decisions to be taken and submitted to the stakeholders involved in the management and intervention in such critical situations. To this end, a system to assist emergency management was first proposed and modeled by the creation of prescriptive and adaptive simulation scenarios. This system was then realized via a web-mobile application. The latter, thanks to the advantages that offers, facilitates the tasks of the stakeholders, improves the quality of the communications, reduces the time required for evacuation and, therefore, limits the scope of the damage.

## Keywords

Critical infrastructure security, interdependency problem, power grid failure, hospital infrastructure, management support system, prescriptive scenarios, simulation, web-mobile application.

# Résumé

L'apparition d'un grand nombre de vulnérabilités et l'interdépendance croissante des activités économiques et sociales ont placés les réseaux vitaux dans une situation notamment délicate. Ces réseaux constituent les infrastructures critiques dont la sûreté et la sécurité de chacune d'entre elles dépend des autres. Etant de plus en plus interdépendantes, leur mise en défaut peut avoir des conséquences catastrophiques sur l'ensemble. Afin de gérer et sécuriser ces infrastructures et diminuer leurs vulnérabilités, plusieurs travaux visant à les protéger se sont développés. Les travaux de cette thèse visent à étudier la problématique de la survenue d'une défaillance électrique au sein des infrastructures hospitalières et à fournir des solutions anticipatives sous forme de décisions à prendre et à soumettre aux parties prenantes concernées par la gestion et l'intervention dans telles situations critiques. Pour cela, un système d'aide à la gestion des interventions d'urgence a été d'abord proposé et modélisé par la création de scénarios prescriptifs et adaptatifs de simulation. Ce système a été ensuite réalisé via une application web-mobile. Cette dernière, a permis grâce aux avantages qu'elle peut offrir, de faciliter les tâches des intervenants, d'améliorer la qualité des communications, de réduire le temps nécessaire pour l'évacuation et par conséquent de limiter les dégâts.

## Mots clés

Sécurité des infrastructures critiques, problème d'interdépendance, défaillance du réseau électrique, infrastructure hospitalière, système d'aide à la gestion, scénarios prescriptifs, simulation, application web-mobile.

# Table des matières

<b>Remerciements</b> -----	<b>iii</b>
<b>ملخص</b> -----	<b>vi</b>
<b>Abstract</b> -----	<b>vii</b>
<b>Résumé</b> -----	<b>viii</b>
<b>Liste des figures</b> -----	<b>xiii</b>
<b>Liste des tableaux</b> -----	<b>xiv</b>
<b>Liste des abréviations</b> -----	<b>xv</b>

## Introduction générale

1. Contexte et problématique-----	9
2. Motivation et contributions-----	10
3. Structure de la thèse -----	11

## Chapitre I

### Sécurisation des infrastructures critiques interdépendantes

I.1 Introduction-----	15
I.2 Infrastructures critiques (ICs) -----	16
<i>I.2.1 Définition</i> -----	16
<i>I.2.2 Secteurs des ICs</i> -----	16
I.3 Etude des interdépendances des ICs -----	17
<i>I.3.1 Définitions</i> -----	17
<i>I.3.2 Classification des interdépendances</i> -----	18
<i>I.3.3 Exemples d'interdépendances</i> -----	18
I.4 Problème d'interdépendance entre les ICs -----	19
<i>I.4.1 Vulnérabilité des ICs</i> -----	19
<i>I.4.2 Défaillances des ICs</i> -----	19
I.4.2.a Définition de la défaillance -----	19
I.4.2.b Types de défaillances -----	19
I.5 Sécurisation des ICs -----	20
<i>I.5.1 Définition de la sécurisation des ICs</i> -----	21
<i>I.5.2 Risques liés à la sécurité des ICs</i> -----	21
I.5.2.a Définition du risque -----	21
I.5.2.b Types des risques-----	21
<i>I.5.3 Evaluation et gestion des risques</i> -----	22
I.5.3.a Evaluation du risque-----	22
I.5.3.b Gestion des risques -----	23
I.6 Modélisation et simulation des ICs interdépendantes-----	24
<i>I.6.1 Méthodes de modélisation des ICs</i> -----	24
I.6.1.a Modélisation et simulation prescriptive -----	25

I.6.1.b Modélisation et simulation basée agents -----	26
I.6.2 Travaux connexes-----	27
I.6.3 Approches de simulation-----	29
I.6.3.a Approche d'intégration de modèles-----	29
I.6.3.b Approche de fédération de simulateurs -----	30
I.7 Conclusion-----	31

## Chapitre II

### Gestion du réseau électrique dans les infrastructures hospitalières

II.1 Introduction-----	34
II.2 Importance de l'électricité dans les hôpitaux -----	35
II.2.1 Secteurs alimentés par l'électricité -----	35
II.2.1.a Eclairage -----	35
II.2.1.b Equipements -----	35
II.2.2 Criticité des activités médicales aux coupures électriques -----	36
II.3 Sources d'alimentation électrique-----	38
II.3.1 Source d'alimentation normale-----	38
II.3.2 Source d'alimentation alternative-----	38
II.4 Origines des ruptures d'électricité-----	39
II.4.1 Causes d'origines externes-----	39
II.4.2 Causes d'origines internes -----	40
II.5 Impacts de la défaillance du réseau électrique -----	40
II.6 Défaillance du système d'alimentation alternative : causes et conséquences -----	41
II.7 Sûreté de fonctionnement des installations électriques -----	42
II.8 Planification de la gestion des risques électriques -----	43
II.8.1 Préparation à la gestion d'un risque électrique-----	43
II.8.2 Gestion des risques électriques -----	44
II.8.2.a Analyse des risques électriques -----	44
II.8.2.b Réduction des risques électriques-----	45
II.8.2.c Communication sur le risque électrique -----	45
II.8.3 Paramètre déterminant dans la gestion de risque-----	46
II.9 Discussion et conclusion-----	46

## Chapitre III

### Système d'Aide à la Gestion des Interventions d'Urgence (SAGIU) : Description & Modélisation

III.1 Introduction-----	50
III.2 Littérature sur l'évacuation des hôpitaux -----	50
III.3 Cas réels de pannes électriques dans les hôpitaux-----	53
III.4 Processus de la prise de décision d'évacuation -----	55
III.5 Problèmes d'évacuation à la suite d'une panne électrique -----	57
III.5.1 Problèmes avant l'évacuation-----	58

III.5.2 Problèmes durant l'évacuation	59
III.5.3 Problèmes après l'évacuation	59
III.6 Système d'aide à la gestion des interventions d'urgence (SAGIU)	60
III.6.1 Description du SAGIU	60
III.6.2 Sous processus du SAGIU	61
III.6.2.a Sous processus de déclenchement de l'alerte (SP1)	62
III.6.2.b Sous processus d'identification des patients à évacuer (SP2)	63
III.6.2.c Sous processus de priorisation des patients (SP3)	63
III.6.2.d Sous processus de préparation des patients (SP4)	65
III.6.2.e Sous processus de transport des patients (SP5)	66
III.6.3 Agents intervenants du SAGIU	68
III.6.3.a Agents intervenants avant la panne	68
III.6.3.b Agents intervenants pour décider et lancer le processus d'évacuation	68
III.6.3.c Agents intervenants pour appliquer le processus d'évacuation	69
III.6.4 Modélisation et simulation prescriptive du SAGIU	70
III.6.4.1 Scénarios prescriptifs	70
III.7 Conclusion	73

## Chapitre IV

### Système d'Aide à la Gestion des Interventions d'Urgence (SAGIU) : Application & Résultats

IV.1 Introduction	76
IV.2 Objectifs de l'application	76
IV.3 Architecture de l'application	77
IV.3.1 Les agents	77
IV.3.2 La base de données	78
IV.3.3 Le serveur web	79
IV.4 Modèle de la base de données de l'application	79
IV.5 Implémentation de l'application	81
IV.6 Fonctions de l'application	83
IV.6.1 Authentification des utilisateurs	84
IV.6.2 Gestion des patients (Portail d'accueil)	85
IV.6.3 Déclenchement de l'alerte (Portail admin)	86
IV.6.4 Exécution des actions du processus d'évacuation (Portail principal)	87
IV.6.4.a Scénario d'une action de préparation d'un patient	89
IV.6.4.b Scénario d'une action de transport d'un patient au rez-de-chaussée	90
IV.6.4.c Scénario d'une action de transport d'un patient vers un autre hôpital	90
IV.7 Test et validation	91
IV.8 Discussion et conclusion	93
<b>Conclusion générale</b>	95
<b>Références bibliographiques</b>	97
<b>Contributions scientifiques</b>	103
Publications internationales	103

*Conférences internationales*-----103

**Annexe**

*A.1 Présentation du cas d'étude : Hôpital Bouzidi Lakhdar de Bordj Bou Arréridj* -----104

    A.1.1 Capacité technique de l'hôpital -----104

    A.1.2 Effectif de l'hôpital -----105

*A.2 Source d'alimentation alternative de l'hôpital* -----105

*A.3 Questionnaire dédié pour les intervenants* -----106

*A.4 Fiche d'évacuation de malades entre établissements de santé*-----107

*A.5. Fiche de convention de stage effectuée au niveau de l'hôpital* -----108

# Liste des figures

Figure I.1. Principaux secteurs d'infrastructures critiques .....	16
Figure I.2. Interdépendance des infrastructures critiques .....	17
Figure I.3. Différentes méthodologies de modélisation des ICs .....	25
Figure I.4. Modélisation et simulation descriptive/prescriptive .....	26
Figure I.5. Modèle de fédération de simulateurs .....	30
Figure II.1. Criticité des activités médicales aux coupures électriques .....	37
Figure II.2. Sources d'alimentation dans les établissements de santé .....	39
Figure III.1. Processus de décision de l'évacuation.....	56
Figure III.2. Intervenants impliqués dans le processus d'évacuation .....	57
Figure III.3. Description de la problématique.....	58
Figure III.4. Sous processus du SAGIU.....	62
Figure III.5. Sous processus de déclenchement de l'alerte .....	63
Figure III.6. Sous processus d'identification des patients à évacuer .....	63
Figure III.7. Sous processus de priorisation des patients.....	64
Figure III.8. Sous processus de préparation des patients .....	65
Figure III.9. Sous processus de transport des patients (1 <sup>ère</sup> étape).....	66
Figure III.10. Sous processus de transport des patients (2 <sup>ième</sup> étape).....	67
Figure III.11. Diagramme de cas d'utilisation général .....	69
Figure III.12. Scénario d'action réussie.....	71
Figure III.13. Phases de déroulement d'une action.....	72
Figure III.14. Modèle prescriptif du SAGIU pour un patient .....	72
Figure IV.1. Architecture de l'application.....	78
Figure IV.2. Modèle de la base de données de l'application .....	80
Figure IV.3. Le modèle de conception MVC .....	81
Figure IV.4. Outils de développement de l'application proposée .....	83
Figure IV.5. Mécanisme de l'application .....	84
Figure IV.6. Authentification des utilisateurs.....	84
Figure IV.7. Ajouter un patient.....	85
Figure IV.8. Liste des patients hospitalisés .....	85
Figure IV.9. Scenario A : Déclenchement d'une alerte .....	87
Figure IV.10. Phases d'exécution des actions.....	88
Figure IV.11. Scenario B : Exemple d'une action de préparation d'un patient.....	89
Figure IV.12. Scenario C : Exemple d'une action de transport d'un patient (1 <sup>ère</sup> étape). .....	90
Figure IV.13. Scenario D : Exemple d'une action de transport d'un patient (2 <sup>ième</sup> étape). .....	91
Figure IV.14. Opinions des utilisateurs sur la facilité d'utilisation de l'application.....	92

# Liste des tableaux

Tableau II.1. Equipements alimentés en électricité .....	36
Tableau III.1. Cas réels de pannes électriques dans les hôpitaux .....	54
Tableau III.2. Intervenants du processus d'évacuation .....	61
Tableau IV.1. Estimation des indicateurs avec et sans la solution proposée .....	90
Tableau A.1.1. Capacité technique de l'hôpital Bouzidi Lakhdar .....	104
Tableau A.1.2. Effectif de l'hôpital Bouzidi Lakhdar .....	105

# Liste des abréviations

<b>ICs</b>	Infrastructures Critiques
<b>ABMS</b>	Agent based modeling and simulation
<b>SAGIU</b>	Système d'aide à la gestion des interventions d'urgence
<b>AGH</b>	Agents de gestion de l'hôpital
<b>AGM</b>	Agent de gestion médicale
<b>AGS</b>	Agent de gestion de la sécurité et de la protection
<b>AGT</b>	Agent de gestion des transports
<b>SP1</b>	Sous processus de déclenchement de l'alarme
<b>SP2</b>	Sous processus d'identification des patients à évacuer
<b>SP3</b>	Sous processus de priorisation des patients
<b>SP4</b>	Sous processus de préparation des patients
<b>SP5</b>	Sous processus de transport des patients
<b>MVC</b>	Model-View-Controller

---

# Introduction générale

## 1. Contexte et problématique

Les infrastructures critiques sont constituées par l'ensemble des systèmes essentiels assurant le bon fonctionnement et le déroulement vital des communautés ainsi que le bien-être social et économique de leurs citoyens à l'exemple des réseaux d'électricité, d'eau, de gaz, de santé, de télécommunication et de transport.

Du fait des avancements technologiques, ces infrastructures qui étaient auparavant physiquement séparées, sont devenu de plus en plus interconnectées constituant des réseaux d'infrastructures interdépendantes. Ces réseaux sont caractérisés par une interdépendance d'ordre logique, géographique ou physique, qui offre de nombreux avantages pour leur bon fonctionnement. Cependant, une défaillance de l'une d'entre elles suite par exemple au non disponibilité ou l'absence d'un service peut influencer négativement sur l'ensemble par la manifestation de pannes dans le reste des infrastructures.

Dans un monde moderne avec une interdépendance croissante dans les systèmes interconnectés qui comptent sur l'électricité, la fiabilité de l'alimentation électrique est devenue de plus en plus critique. Puisque les gens sont extrêmement dépendants de leur mode de vie, une panne de courant se révèle presque catastrophique.

L'électricité compte désormais, parmi les éléments stratégiques dans les infrastructures de santé. Les hôpitaux ont besoin d'être alimentés continuellement en électricité pour garder tous leurs services en état d'alerte et pour protéger les patients, surtout ceux dont les vies dépendent des équipements électriques. De nos jours, les pannes de courant dans le réseau d'électricité en raison de catastrophes naturelles ou de consommation plus forte d'énergie électrique sont des événements communs qui se produisent fréquemment. En fait, une panne de courant ou un dysfonctionnement d'un transformateur ou d'un générateur électrique peuvent provoquer une paralysie totale des services médicaux qui accueillent habituellement un bon nombre de

patients dans des situations critiques et qui exigent très souvent d'être sous soins intensifs. De telles situations peuvent s'achever par une catastrophe qui peut causer la mort de certains patients et de graves dommages dans les services sensibles telles que la pharmacie, la banque de sang et la morgue.

En dépit de la fiabilité accrue et la résistance des systèmes électriques modernes à des dommages physiques, les risques associés aux défaillances électriques restent nuisibles et très inquiétants. D'autant plus que l'impact des pannes électriques sur les infrastructures sanitaires reste loin d'être pris en charge et traité d'une manière efficace. Ce constat ne peut que stimuler une recherche plus approfondie pour prévenir et atténuer rigoureusement les effets néfastes d'un tel problème sur la santé.

Ce travail s'intéresse à la relation de dépendance entre les deux systèmes d'aide à la vie, l'infrastructure hospitalière et le réseau électrique. Plus précisément, il se concentre sur l'impact des défaillances du réseau électrique dans le secteur de la santé.

Une attention particulière est donnée à l'événement exceptionnel de survenue d'une panne de courant partielle ou générale à la suite de laquelle l'hôpital doit prendre une décision sur l'évacuation des patients concernés et leur personnel médical. Cette décision intervient après l'échec d'une série d'étapes et de mesures préventives telles que l'utilisation et l'épuisement de toutes les sources d'alimentation de secours existantes, alors que la panne de courant persiste et la situation des patients se détériore.

Selon la nature des occupants, une évacuation complète reste toujours la dernière solution à adopter par les responsables des infrastructures sanitaires. Lorsque les patients comptent sur des équipements électriques sensibles qui fournissent un soutien vital, ils ont besoin d'un certain temps et d'un ensemble de parties prenantes pour être évacués de l'hôpital. Le point critique dans cette situation d'urgence est la mise en place d'une méthode de gestion du processus d'évacuation, qui assure une bonne communication entre les différentes parties prenantes impliquées et qui évite le désordre, la panique et la perte de temps.

## **2. Motivation et contributions**

Cette idée a été concrétisée dans le présent travail par la mise au point de solutions anticipatives sous forme de décisions à prendre et à soumettre aux différentes parties prenantes concernées par la gestion du processus d'évacuation et l'intervention dans de telles situations critiques.

Ces solutions, ont été réalisées à travers le développement d'un système d'aide à la gestion des interventions d'urgence (SAGIU) modélisé par la création de scénarios prescriptifs et adaptatifs de simulation.

Cette idée, en elle-même, est nouvelle pour le cas d'une panne électrique et offre de bonnes performances en termes d'efficacité et de réduction du temps d'évacuation. Cependant, à lui seul, le SAGIU reste insuffisante pour permettre un niveau de sécurisation acceptable des vies des patients critiques à cause des problèmes réels d'acquisition de données et de communication entre les différents intervenants qui s'imposent surtout au cas d'une défaillance électrique affectant même le système informatique inter hospitalier. De ce fait, le SAGIU a été intégré au sein d'une application web-mobile. Ceci, a permis de jumeler l'efficacité du SAGIU et les avantages de la technologie sans fil et par conséquent de faciliter les tâches des intervenants, d'améliorer la qualité des communications, de réduire le temps nécessaire pour l'évacuation et de limiter au maximum les dégâts.

Dans ce cadre et afin d'évaluer la performance de la solution proposée, des tests ont été réalisés dans une véritable infrastructure hospitalière, l'hôpital Bouzidi Lakhdar de Bordj Bou Arréridj pendant un stage pratique d'un mois. Les résultats ont montré que l'utilisation d'un tel SAGIU au sein d'une application web mobile basée sur la création des scénarios prescriptifs de simulation, comparé aux moyens classiques, présentait de nombreux avantages, notamment un temps de traitement extrêmement court, une meilleure qualité des informations, des interfaces conviviales et des données facilement accessibles à partir de n'importe quel emplacement et périphériques connecté à l'Internet. Toutes ces caractéristiques et avantages ont confirmé la validité du système proposé.

### **3. Structure de la thèse**

Nous commençons cette thèse, par un premier chapitre intitulé « *Sécurisation des infrastructures critiques interdépendantes* ». Dans sa première partie, on donne une description détaillée des infrastructures critiques en commençant tout d'abord par les définir et déterminer leurs secteurs. Puis, nous définissons et classifions leurs types d'interdépendance et étudions le problème s'y afférant. Dans la deuxième partie, on parle du domaine de sécurisation de ces infrastructures en présentant les différents risques liés à leurs protections (définition et types), ensuite on détermine la démarche d'évaluation et de gestion de ces risques lors d'un événement catastrophique. La dernière partie de ce chapitre est consacré à la présentation des différentes

méthodes de modélisation des infrastructures critiques interdépendantes ainsi que les principales approches de simulation utilisée dans ce domaine. De plus, quelques études et travaux de recherche qui proposent des moyens pour répondre aux besoins et critères de sécurité des infrastructures critiques ont été cités.

Le deuxième chapitre sous le titre « *Gestion du réseau électrique dans les infrastructures hospitalières* » s'attache notamment aux infrastructures hospitalières et aux réseaux électriques associés qui sont d'une importance majeure pour leur bon fonctionnement en commençant par définir l'importance et les secteurs alimentés par l'électricité dans les établissements de santé. Puis, on parle des différentes sources d'alimentation électrique. Ensuite, nous présentons les causes de la défaillance du réseau électrique et son impact sur les fonctions et les patients de l'établissement. Enfin, on définit les démarches de sûreté de fonctionnement des installations électriques et de la gestion des risques électriques que les établissements de santé adoptent et pratiquent contre la survenue des pannes électriques.

Le troisième chapitre qui s'intitule « *Système d'aide à la Gestion des Interventions d'Urgence (SAGIU) : Description & Modélisation* » est subdivisé en plusieurs parties. Dans la première partie, une littérature détaillée sur les différents travaux de recherche traitant les problèmes d'évacuation des hôpitaux est présentée. La deuxième partie, cite et analyse plusieurs cas réels de pannes électriques qui ont survenu dans différents hôpitaux dans le monde et qui ont nécessité l'évacuation des patients. Dans la troisième partie, les différents paramètres entraînant la décision du processus d'évacuation d'un hôpital sont définis. Dans la quatrième partie, les principaux problèmes d'évacuation à la suite d'une panne de courant sont exposés. Enfin, dans la dernière partie, la description et la modélisation des différents sous processus du système proposé sont présentés en détail.

« *Système d'aide à la Gestion des Interventions d'Urgence (SAGIU) : Application & Résultats* » présente le quatrième chapitre de cette thèse. Ce dernier est composé de quatre parties. La première partie présente les objectifs à atteindre et la spécification des besoins et les exigences auxquelles notre application devra répondre. La deuxième partie décrit l'architecture technique de l'application développée, à travers la définition de l'ensemble des outils techniques qu'on a utilisés. La troisième partie présente l'ensemble des fonctionnalités et des exemples d'interfaces de l'application développée. Dans la dernière partie, les étapes de tests et de validation de l'application proposée ainsi qu'une discussion sont présentés.

Enfin, nous terminons cette thèse par une conclusion générale et perspective.

# Chapitre I

---

## **Sécurisation des infrastructures critiques interdépendantes**

---

**SOMMAIRE**


---

I.1 Introduction-----	15
I.2 Infrastructures critiques (ICs) -----	16
I.2.1 Définition -----	16
I.2.2 Secteurs des ICs -----	16
I.3 Etude des interdépendances des ICs -----	17
I.3.1 Définitions-----	17
I.3.2 Classification des interdépendances-----	18
I.3.3 Exemples d'interdépendances-----	18
I.4 Problème d'interdépendance entre les ICs -----	19
I.4.1 Vulnérabilité des ICs-----	19
I.4.2 Défaillances des ICs -----	19
I.4.2.a Définition de la défaillance -----	19
I.4.2.b Types de défaillances -----	19
I.5 Sécurisation des ICs -----	20
I.5.1 Définition de la sécurisation des ICs -----	21
I.5.2 Risques liés à la sécurité des ICs -----	21
I.5.2.a Définition du risque -----	21
I.5.2.b Types des risques -----	21
I.5.3 Evaluation et gestion des risques-----	22
I.5.3.a Evaluation du risque-----	22
I.5.3.b Gestion des risques -----	23
I.6 Modélisation et simulation des ICs interdépendantes-----	24
I.6.1 Méthodes de modélisation des ICs-----	24
I.6.1.a Modélisation et simulation prescriptive -----	25
I.6.1.b Modélisation et simulation basée agents -----	26
I.6.2 Travaux connexes-----	27
I.6.3 Approches de simulation-----	29
I.6.3.a Approche d'intégration de modèles-----	29
I.6.3.b Approche de fédération de simulateurs -----	30
I.7 Conclusion-----	31

---

## I.1 Introduction

Au cours de ces dernières années, la gestion des catastrophes est devenue une préoccupation majeure au sein des organismes concernés par la prise de décisions et ce dans la plupart des pays du monde. La principale raison serait incontestablement les exigences, de plus en plus croissantes, liées au renforcement de la sécurisation des réseaux vitaux. Ces réseaux, qui sont généralement constitués par l'ensemble des infrastructures critiques soutenant les différentes activités économiques et sociales, interagissent mutuellement de sorte que la sécurité de chacun est souvent dépendante de celles des autres. De ce fait, ces infrastructures critiques peuvent, en cas de défaillance ou d'événement catastrophique, s'affronter à des situations dangereuses, très complexes et difficiles à gérer. Plus ces infrastructures sont interdépendantes, plus les conséquences de leur échec sur l'ensemble sont catastrophiques.

De cet acte, l'anticipation de solutions au problème de production de ces événements exceptionnels non souhaités peut éviter ou du moins atténué les situations catastrophiques qui peuvent en découlent. Dans ce contexte, la modélisation et la simulation apparaissent comme une première étape pour étudier et faire face aux propagations de ces défaillances.

Pour mieux gérer ces infrastructures et réduire leurs vulnérabilités, plusieurs travaux de recherche se sont effectués. Ce chapitre est composé principalement de trois parties principales:

Dans la première partie, on donne une description détaillée des infrastructures critiques en commençant tout d'abord par leurs donner une définition et déterminer leurs secteurs. Puis, nous définissons et classifions leurs types d'interdépendance et étudions le problème s'y afférant. Dans la deuxième partie, on parle du domaine de sécurisation de ces infrastructures en présentant les différents risques liés à leurs protections (définition et types), ensuite on détermine la démarche d'évaluation et de gestion de ces risques lors d'un événement catastrophique. La dernière partie de ce chapitre est consacré à présenter les différentes méthodes de modélisation des infrastructures critiques interdépendantes ainsi que les principales approches de simulation utilisée dans ce domaine. De plus, quelques études et travaux de recherche qui proposent des moyens pour répondre aux besoins et critères de sécurité des infrastructures critiques ont été cité.

## I.2 Infrastructures critiques (ICs)

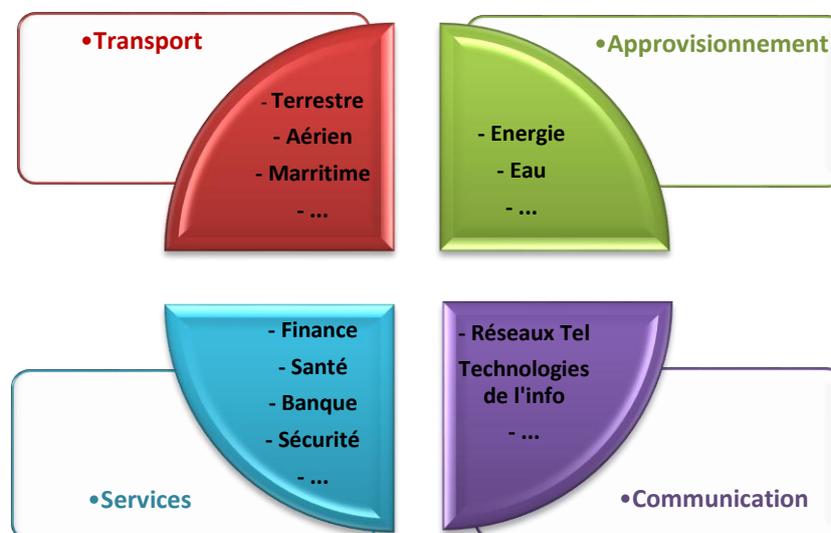
### I.2.1 Définition

Par « infrastructure critique » on désigne les organisations et les établissements présentant une importance particulièrement critique pour les institutions publiques et dont la défektivité ou la perturbation provoqueraient des dysfonctionnements considérables au niveau des secteurs sanitaires, sécuritaires ou économiques (Berlin, 2008).

### I.2.2 Secteurs des ICs

Les ICs sont subdivisées en secteurs et en sous-secteurs ; à titre d'exemple, les approvisionnements en électricité, en pétrole et en gaz naturel représentent des sous-secteurs appartenant au secteur de l'énergie. Un sous-secteur est constitué d'éléments ou objets (exploitants, installations, systèmes, ... etc.) qui sont considérés comme des composants d'ICs ; il est toutefois évident qu'ils n'ont pas tous la même importance ou criticité (Département fédéral de la défense, 2015).

Les ICs sont présentes dans plusieurs secteurs vitaux, notamment les établissements bancaires et financiers, les transports, l'approvisionnement en eau et énergie, la santé, les communications, ainsi que les services administratifs stratégiques. La figure (I.1) illustre les quatre principaux secteurs des ICs (Attia, Boubetra, & Saad Saoud, 2014):



**Figure I.1.** Principaux secteurs d'infrastructures critiques

## I.3 Etude des interdépendances des ICs

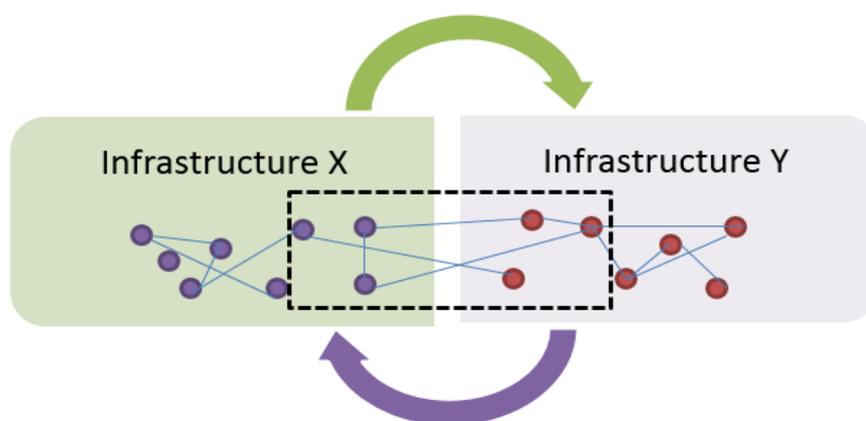
### I.3.1 Définitions

Les ICs sont principalement caractérisées par plusieurs types d'interactions constituant un système complexe et dynamique ; ce qui leur impose une interdépendance souvent incontournable. Ainsi, un impact sur une infrastructure donnée peut affecter d'autres infrastructures de différentes manières.

Afin d'analyser correctement la vulnérabilité d'une IC, les concepts de dépendance et d'interdépendance ont été introduits pour la première fois dans la référence (Rinaldi, Peerenboom, & Kelly, 2001) :

- La dépendance est une relation unidirectionnelle entre deux infrastructures de manière que, l'état d'une infrastructure est influençable par l'état de l'autre, mais pas vice versa.
- L'interdépendance, comme présenté sur la figure (I.2), est une relation bidirectionnelle entre deux infrastructures telles que, l'état d'une infrastructure est influençable par l'état de l'autre et vice versa.

Au fait, cette dépendance ou interdépendance s'installe entre les composants des deux infrastructures. En plus, à l'intérieur de chaque infrastructure, il peut aussi y avoir une dépendance ou interdépendance entre les composants mêmes de celle-ci.



**Figure I.2.** *Interdépendance des infrastructures critiques*

### **I.3.2 Classification des interdépendances**

Dans la référence (Rinaldi, Peerenboom, & Kelly, 2001), les auteurs ont identifié et proposé quatre classes d'interdépendances : physique, cybernétique, géographique et logique. Dans la classe physique, on dit que deux infrastructures sont physiquement interdépendantes si l'état de chacune dépend d'une sortie matérielle de l'autre. Pour l'interdépendance cybernétique, une infrastructure a une dépendance cybernétique si son état dépend des informations transmises via une infrastructure informatique.

Pour la troisième classe, on dit que deux infrastructures sont géographiquement interdépendantes lorsqu'un événement local, tel qu'un incendie ou un tremblement de terre, peut créer un changement dans leurs états. Dans cette classe, l'interdépendance peut concerner plus de deux infrastructures. Dans la quatrième classe, on parle d'interdépendance logique entre ICs, quand l'état de chacune dépend de l'état de l'autre par des procédés autres que physiques, cybernétiques ou géographiques. Cette classe qui représente la forme la plus cachée de l'interdépendance est très difficile à repérer. En général, ce modèle d'interdépendance implique des décisions humaines. Par exemple, les autoroutes pendant les vacances seront moins surchargées lorsque le prix des carburants sera plus élevé.

### **I.3.3 Exemples d'interdépendances**

Une panne dans une IC peut avoir de graves répercussions sur d'autres ICs. Par exemple :

- Une défaillance dans le réseau électrique urbain peut conduire au dysfonctionnement des systèmes de pompage ce qui provoquerait des coupures dans l'approvisionnement en eau potable dans de nombreuses communautés.
- Le réseau électrique et le réseau de distribution de gaz sont interdépendants. Du fait que plusieurs éléments de l'infrastructure gazière tels que les compteurs, les compresseurs, etc... fonctionnent à base d'électricité, toute perturbation dans le système électrique peut causer la perte de pression du gaz naturel ; ce qui conduit à son tour à la réduction de la production d'électricité.
- Afin de fonctionner correctement, le réseau de distribution d'électricité, requiert l'utilisation de systèmes de télécommunications assurant la supervision et l'acquisition de données, ainsi que la communication entre les centres de contrôle et le personnel d'entretien. Cependant, ces

systèmes de télécommunications nécessitent également un approvisionnement permanent en énergie électrique pour fonctionner.

## **I.4 Problème d'interdépendance entre les ICs**

La santé, la richesse et la sécurité d'une nation dépendent étroitement de certains biens et services qui sont produits par les ICs. En conséquence, la protection de ces dernières contre les catastrophes naturelles ou toute attaque malveillante est considérée comme une mission stratégique de très haute importance. Néanmoins, l'interdépendance des ICs constitue un problème majeur du fait que la sécurisation de chaque IC doit nécessairement tenir compte de celles des autres.

### **I.4.1 Vulnérabilité des ICs**

Les ICs peuvent subir des dégâts et leurs perturbations peuvent avoir de lourdes conséquences sociales et économiques. En effet, les différents types de menaces tels que les catastrophes naturelles, les erreurs humaines, les défaillances techniques ou ainsi que les opérations criminelles peuvent être à l'origine de plusieurs dommages considérables.

De plus, tant que la majorité des systèmes des ICs sont aujourd'hui connectés les uns aux autres d'une manière ou une autre, leurs vulnérabilités ne cessent pas d'évoluer. Et de ce fait, toute perturbation dans un domaine quel qu'il soit peut se répercuter dans un autre lieu, dans une autre branche ou un autre secteur, et avoir ainsi des conséquences bien au-delà de son point d'origine (Berlin, 2008).

### **I.4.2 Défaillances des ICs**

#### **I.4.2.a Définition de la défaillance**

D'après (Benoit, 2009), une défaillance d'un système correspond à un défaut, c'est-à-dire une imperfection ou une absence d'une partie ou de la totalité du fonctionnement attendu de ce système.

#### **I.4.2.b Types de défaillances**

Une défaillance au niveau d'une IC est souvent causée par des fragilités et des vulnérabilités de certains composants physiques ou logiques. L'effet de cette défaillance, risque de se

propager très rapidement, parfois instantanément, et donc d'affecter la sûreté de fonctionnement et la sécurité de la totalité des infrastructures dépendantes ou interdépendantes.

Concernant les ICs interdépendantes dont le risque de panne et de perturbation est jugé très probable, il existe trois grandes catégories de défaillances (Rinaldi, Peerenboom, & Kelly, 2001) :

- **Défaillance en cascade** : une rupture dans une première infrastructure va causer une défaillance d'un composant d'une autre infrastructure interdépendante qui va être également perturbée en conséquence. Cet incident peut à son tour provoquer une défaillance dans une troisième infrastructure, et ainsi de suite.

- **Défaillance en escalade** : une perturbation dans l'une des infrastructures va s'aggraver à la suite d'une interruption indépendante dans une deuxième infrastructure, principalement en affectant le temps de récupération ou de restauration. En d'autres termes se sont des défaillances mineures qui vont se combiner pour provoquer des conséquences graves. A titre d'exemple, une perturbation dans un réseau de télécommunications peut être aggravée considérablement par une perturbation simultanée dans un réseau de transport routier, comme par exemple dans le cas où le personnel et le matériel de réparation seraient retardés.

- **Défaillance de cause commune** : dans ce cas deux ou plusieurs infrastructures sont perturbées en même temps par une cause commune. Par exemple, lors d'une tempête, les arbres peuvent tomber simultanément sur les lignes téléphoniques et électriques, provoquant ainsi des perturbations dans les deux réseaux, de télécommunications et de distribution d'énergie, à la fois.

## I.5 Sécurisation des ICs

Pour éviter les méfaits de ces défaillances ou, du moins, les atténuer il est donc primordial de les prendre en considération grâce au renforcement de la protection et de la sécurisation des ICs.

Pour ce faire, les gestionnaires des ICs doivent avant tout accepter le fait qu'une IC est susceptible d'être exposée à tout moment à des perturbations ou des défaillances. Par la suite, des seuils de perturbations tolérables peuvent, alors, être définis en fonction des ressources

utilisées par chaque IC. Enfin, des mesures de protection ou d'atténuation peuvent, alors, être planifiées conformément à ces seuils.

Il est, cependant, impératif de mettre en place des outils de prévision afin de mobiliser le plus tôt possible les ICs potentiellement affectées par une défaillance quelconque (Benoît, 2013).

### **I.5.1 Définition de la sécurisation des ICs**

La sécurisation d'un système quelconque consiste à éviter ses défaillances les plus fréquentes ou les plus inacceptables, les diagnostiquer et effectuer les opérations de réparations nécessaires. C'est donc l'ensemble des opérations de protection contre les éventuels problèmes de défaillances, qui contribuent à la sûreté de fonctionnement du système (Benoit, 2009).

La sécurisation des ICs, quand-à-elle, a été définie par Benoit, dans (Benoit, 2009), comme étant : « une tâche complexe qui ne peut être accomplie que si le comportement des systèmes multi-infrastructures est rigoureusement analysé et bien maîtrisé et en particulier leurs interdépendances ».

Par ailleurs, on peut dire que la sécurisation des ICs consiste à les protéger tout en diminuant au maximum la probabilité d'apparition de défaillances et en réduisant leurs impacts par des rapports d'analyse et des tâches de rétablissement et de réparation.

### **I.5.2 Risques liés à la sécurité des ICs**

#### **I.5.2.a Définition du risque**

Le risque peut être défini comme étant le potentiel de pertes en raison d'une défaillance dans une infrastructure résultant d'un incident ou d'un événement (Ayyub & McCuen, 2011). Par ailleurs, Le risque est un critère efficace et très sollicité pour diagnostiquer la sûreté des ICs. Aussi, son évaluation et sa gestion constituent deux concepts pertinents pour l'analyse exhaustive de la vulnérabilité des ICs.

#### **I.5.2.b Types des risques**

Il y a une variété de types d'événements qui déclencheraient une défaillance dans les ICs. Selon les auteurs de la référence (Ellison, Mead, Longstaff , & Linger, 2000), on distingue les types suivants :

- **Les accidents** : décrivent une vaste gamme d'événements qui surviennent au hasard et potentiellement dommageables. On peut citer comme exemple, les risques liés aux événements naturels et qui proviennent généralement en dehors des infrastructures.
- **Les échecs** : symbolisent les incidents nuisibles résultant des défaillances dans une infrastructure ou dans un élément externe sur lequel l'infrastructure dépend. Ces risques peuvent être causés par une erreur humaine ou une défaillance technique.
- **Les attaques** : représentent les tentatives d'atteinte aux systèmes par un adversaire dans un but malveillant liés au terrorisme ou aux actes criminels.

### **I.5.3 Evaluation et gestion des risques**

En termes généraux, l'évaluation des risques traite ce que pourrait arriver dans une infrastructure et la gestion des risques concerne la restauration de sa fonctionnalité lors d'un événement catastrophique (Arboleda, 2006).

#### **I.5.3.a Evaluation du risque**

Selon Haines dans la référence (Haines, 1998), le processus d'évaluation des risques est un ensemble d'activités logiques, systématiques bien définies qui fournissent au décideur l'identification, la mesure, la quantification et l'évaluation du risque associé à certains phénomènes naturels ou activités d'origine humaine. Dans cette étape, trois grandes questions sont abordées :

- a) Qu'est-ce qui peut aller mal ?
- b) Quelle est la probabilité que cela va mal ?
- c) Quelles sont les conséquences ?

L'évaluation des risques est menée par de nombreux partenaires des ICs pour répondre à leurs propres besoins en matière de prise de décision, en utilisant un large éventail de méthodes (U.S. Department of Homeland Security, 2010; Arboleda, 2006).

En général, l'approche utilisée est assez commune et linéaire, composée des trois éléments principaux suivants :

- 1- L'identification et la classification des menaces : il s'agit de déterminer la probabilité que l'infrastructure soit menacée par un ou plusieurs événements.

- 2- L'identification des vulnérabilités : il s'agit d'établir Le degré de vulnérabilité de l'infrastructure dans le cas où la menace se réalise matériellement.
- 3- L'évaluation de l'impact : les conséquences et incidences prévisibles pour l'infrastructure toujours dans le cas où la menace se réalise matériellement.

Cette approche est bien connue et établie pour l'évaluation du risque et c'est l'épine dorsale de presque toutes les méthodes d'évaluation des risques (Filippini, Giannopoulos, & Schimmer, 2012).

L'évaluation du risque est donc une étape qui vise à déterminer les mesures d'atténuation des catastrophes qui devraient être prises pour réduire les pertes dans de futures événements en cas de désastre (Arboleda, 2006).

### **I.5.3.b Gestion des risques**

Une fois les faiblesses potentielles du système sont identifiées au niveau de l'étape d'évaluation des risques, il est possible de prendre des décisions en vue d'éliminer les causes importantes des problèmes avant qu'elles ne conduisent vers une défaillance ; en d'autres termes, adopter une approche proactive (plutôt que réactive) dans la gestion des risques permettant de prendre des décisions qui sont fondées non seulement sur l'évaluation des risques mais aussi sur d'autres considérations, y compris économiques, politiques, environnementaux, juridiques et sécuritaires (Murphy & Paté-Cornell, 1996).

Là aussi, comme pour le processus d'évaluation des risques, trois questions importantes s'imposent (Haimes, 1998):

- a) Que peut-on faire ?
- b) Quelles sont les options disponibles et quels sont leurs compromis associés en termes de tous les coûts, les avantages et les risques ?
- c) Quels sont les impacts des décisions de gestion actuelles sur les opérations futures de l'établissement ?

Une réponse judicieuse à ces questions permettrait de trouver les éléments les plus vulnérables du système et par conséquent de reconnaître les moyens à déployer pour résoudre, par ordre de priorité, les différents problèmes bien avant qu'une panne ou un accident ne se produise. Cette tâche, une fois accomplie, servirait à appuyer les décisions de gestion des risques sous

contraintes de ressources, ce qui faciliterait le processus de prise de décision (Paté-Cornell, 2002).

## **I.6 Modélisation et simulation des ICs interdépendantes**

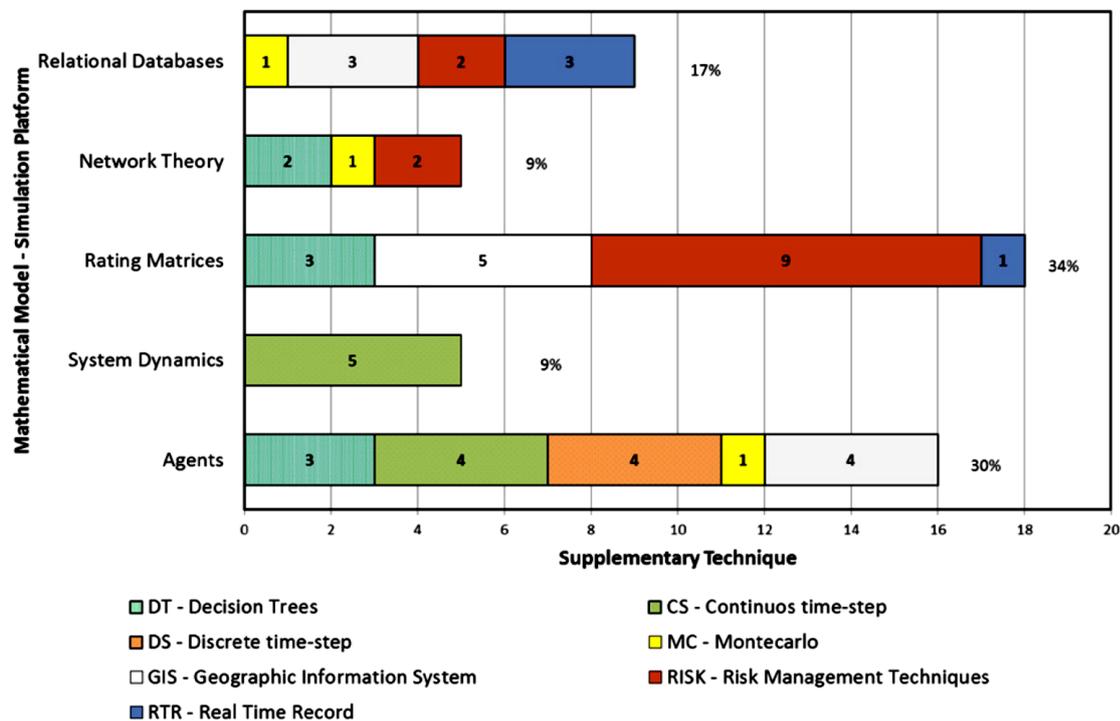
La modélisation et la simulation sont actuellement des méthodes très répandues dans les différentes disciplines scientifiques pour comprendre, étudier et essayer de prédire le comportement des systèmes complexes. Aussi, une analyse rigoureuse des ICs interdépendantes, considérées comme étant des systèmes complexes (Rinaldi, Peerenboom, & Kelly, 2001), ne peut se concrétiser qu'à travers leur modélisation. A cet effet, des efforts considérables sont actuellement dépensés dans le but de développer des modèles qui simulent précisément le comportement des infrastructures essentielles et identifient les interdépendances et les vulnérabilités. Ce sont les résultats de ces simulations qui sont utilisés par la suite au sein des différents organismes concernés par la protection et la sécurisation de leurs ICs (Pederson, Dudenhoefter, Hartley, & Permann, 2006).

Il existe typiquement deux approches de modélisation et de simulation des ICs. La première approche est loin d'être parfaite du fait qu'elle prend en charge uniquement les comportements individuels des ICs sans se soucier de leurs interdépendances. La deuxième approche, en plus de la modélisation des ICs, elle s'intéresse à la modélisation des interdépendances entre les différentes infrastructures ainsi qu'à la simulation de leurs comportements complexes. A cause de la complexité et la grande diversité des paramètres intervenants, Cette deuxième méthode, qui a fait l'objet de plusieurs travaux de recherche, reste toujours un défi pour de nombreux chercheurs.

### **I.6.1 Méthodes de modélisation des ICs**

Au sein du laboratoire national d'Idaho en 2006, un rapport technique (Pederson, Dudenhoefter, Hartley, & Permann, 2006) a été préparé contenant la présentation d'environ 30 projets dédiés au domaine de la modélisation et la simulation des ICs. De plus, un état de l'art sur les différentes méthodologies de modélisation des ICs a été présenté dans la référence (Yusta, Correa, & Lacal-Arántegui, 2011). Les auteurs ont groupé et résumé ces dernières dans la figure (I.3), dont on peut citer : la théorie des graphes, les réseaux de Pétri, les systèmes multi agents, le langage UML, les modèles Monte Carlo et les modèles mathématiques basés sur des équations algébriques etc.

Actuellement, il n'existe pas une classification commune et précise de tous les modèles proposés. D'après (Galli, 2010) on distingue deux principales catégories : les modèles analytiques et les modèles de simulation.



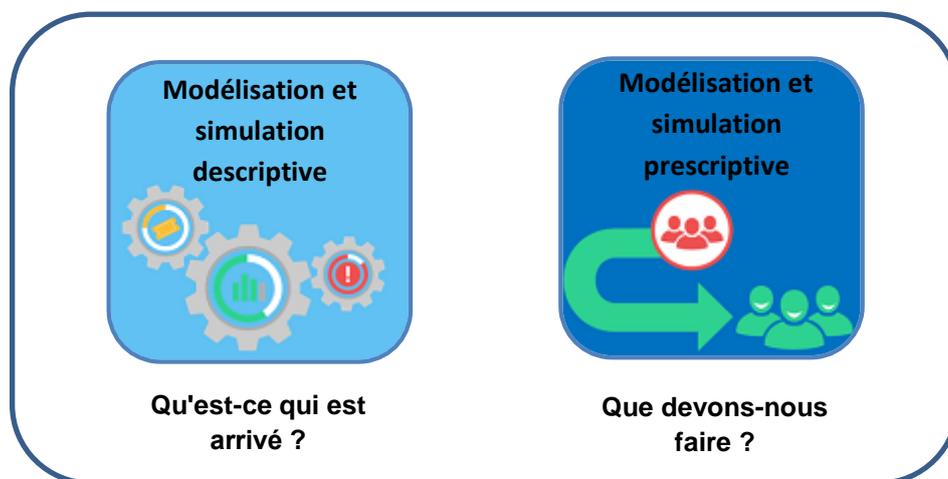
**Figure I.3.** *Différentes méthodologies de modélisation des ICs (Yusta, Correa, & Lacal-Arántegui, 2011).*

### I.6.1.a Modélisation et simulation prescriptive

Noté qu'un modèle descriptif décrit le comportement d'un système. La simulation est en son cœur une technique de modélisation descriptive qui répond à la question : **Qu'est-ce qui est arrivé ?** La simulation est utilisée pour décrire les comportements ou les caractéristiques des systèmes existants ou proposés. Cependant, une utilisation clé de la simulation est de transmettre les comportements ou les propriétés requises d'un système proposé. Dans cette situation, la simulation est utilisée pour prescrire une solution comme présenter dans la figure (I.4). Un modèle prescriptif nous indique ce qu'il faut faire. En d'autres termes, la simulation peut également être utilisée pour la modélisation prescriptive qui répond à la question : **Que devons-nous faire ?** (Rossetti, 2015).

La simulation prescriptive compte parmi les méthodes les plus systématiques pour l'amélioration de la sécurité des ICs à hauts risques. Elle consiste à accroître la prévisibilité des

comportements techniques et humains (Journé, 2001). Cette technique de sécurisation anticipative convoite la suppression de l'imprévu à travers la mise en place d'un système de règles et de procédures capable de prendre en charge tous les cas possibles (Wildavsky, 1988). Ces règles de sécurité ont été définies par (Hale & Swuste, 1998) comme étant un état du système, dans lequel un comportement en réponse à une situation prévue est défini et établi préalablement au déroulement de l'évènement. Ce dernier est imposé et/ou admis par les opérateurs du système comme étant la solution adéquate pour l'amélioration de la sécurité. Il s'agit donc de prévoir et de concevoir des mesures préventives visant à limiter et à maîtriser les dommages et permettant d'éviter d'emblée l'apparition de défaillances catastrophiques ou, du moins, minimiser autant que possible leurs conséquences.



**Figure I.4.** *Modélisation et simulation descriptive/prescriptive*

### **I.6.1.b Modélisation et simulation basée agents**

La modélisation et la simulation basée agents dite ABMS (Agent based modeling and simulation) est une approche utilisant un ensemble d'agents intelligents connectés entre eux. La définition d'un agent est variable selon les domaines et les auteurs. La définition qui s'adapte le plus au type d'agents considérés dans ce travail est celle proposée par (Vidal, Buhler, & Huhns, 2001):

« Un agent est une entité autonome, réelle ou virtuelle, qui est capable d'agir sur elle-même et sur son environnement et qui, dans un univers multi - agents, peut communiquer avec d'autres agents et dont le comportement est la conséquence de ses observations, de ses connaissances et ses interactions avec les autres agents ».

Les avantages de L'ABMS par rapport aux autres méthodes, sont dus au fait que les systèmes multi agents qu'elle utilise sont d'une part, beaucoup plus simples à formuler et d'autre part plus flexibles et facilement extensibles.

### **I.6.2 Travaux connexes**

Des travaux visant à protéger les ICs sont entamés depuis 1996 afin de les consolider et diminuer leurs vulnérabilités. Les annonceurs dans ce domaine sont les États-Unis avec la mise en place de la commission de la protection des ICs en 1996. Depuis lors, la prise en compte de la sûreté et de la sécurité des ICs est devenue un grand défi et un axe de recherche pour de nombreux chercheurs au sein de plusieurs laboratoires. Dans ce qui suit, on va citer quelques travaux connexes :

- **ASPEN (1996)** : des chercheurs au sein des laboratoires nationaux de Sandia (SNL) (Basu, Pryor, & Quint, 1996) ont développé un modèle de micro-simulation à base d'agents pour l'économie américaine. ASPEN possède la possibilité d'améliorer considérablement les capacités d'analyse et de comparaison des politiques économiques en utilisant un ensemble d'agents pour représenter les différents segments de la prise de décision dans l'économie. SNL ont prolongé ce modèle de l'économie par l'inclusion des règles et des agents interactifs représentant les infrastructures d'énergie électrique, du carburant et du gaz sous le nom de ASPEN-EE (Electricity Enhancement) (Barton & Stamber, 2000; Barton, Eidson, Schoenwald, Stamber, & Reinert, 2000). Ce modèle simule les effets interdépendants des décisions et des perturbations dans le système d'alimentation électrique sur d'autres ICs dans l'économie américaine.

- **CISIA (2004)** : ce simulateur développé est décrit par les auteurs (Panzieri, Setola, & Ulivi, 2004) comme un hybride de deux approches de modélisation : l'analyse des interdépendances et l'analyse du système. Le simulateur CISIA est conçu pour analyser les effets à court terme des défaillances en termes de propagation des défauts et de la dégradation des performances par la modélisation des comportements des systèmes d'un ensemble d'ICs en utilisant un paradigme de modélisation à base d'agents interactifs où chacun des agents représente une composante macro du système modélisé et leur description est décrite par la logique floue afin de prendre en compte les incertitudes qui caractérisent les connaissances sur les infrastructures et facilite l'interaction avec les autres parties des infrastructures.

- **Tolone et autres (2004)** : dans l'article (Tolone, et al., 2004), les auteurs ont proposé une approche multi dimensionnelle afin d'étudier le comportement des interdépendances spatiales des ICs en mettant l'accent sur l'analyse des conséquences de leurs interdépendances et en développant un système intelligent à base d'agents pour résoudre le problème d'intégration des ICs tel qu'ils ont choisis comme méthodologie « Brockered methodology » et comme niveau d'intégration « method level integration ».

- **AIMS (2006)** : (*Agent-Based Infrastructure Modeling and Simulation*) est un système multi-agents développé par le laboratoire de systèmes intelligents et adaptés à l'université du Canada pour modéliser et simuler les interdépendances. Il permet de créer des modèles d'ICs et d'analyser le comportement du système modélisé par des scénarios. L'une des caractéristiques particulières de AIMS est qu'il fournit à ses utilisateurs un ensemble de modèles de composants prédéfinis (par exemple les tuyaux, les interrupteurs...). Dans cet article (Bagheri, Baghi, Ghorbani, & Yari, 2007), les auteurs ont mis l'accent sur cet approche de AIMS et la simulation orientée service en modélisant les services, les liaisons et les scénarios effectués entre les différents composants des ICs interdépendantes dans un Meta modèle afin d'analyser leurs comportements tel que chaque agent modélise un de ces composants et son comportement présente les services fournis.

- **CIMS (2006)** : (*Critical Infrastructure Modeling System*) cet environnement de simulation basé agent a événements discrets a été développer afin de fournir aux décideurs un outil très adaptable pour évaluer les vulnérabilités des infrastructures et d'examiner les différentes interactions et interdépendances entre ces infrastructures. CIMS est parrainé par le laboratoire national de IDAHO (INL) dans sa mission d'assurer la protection des infrastructures essentielles et de la protection civile. Les auteurs dans (Dudenhoeffer, Permann, & Manic, 2006) ont parlé de CIMS tel que chaque infrastructure été représentée graphiquement sous forme d'un réseau composé d'un ensemble de nœuds et d'arcs ayant des spécifications particulières tel que les nœuds indiquent les différents secteurs d'influence dans l'infrastructure et chacun des arcs présente le niveau direct de dépendance existant entre deux nœuds. Chaque réseau est modélisé sous forme d'un graphe  $G = (N,E)$  tel que N représente l'ensemble des nœuds et E l'ensemble d'arcs. Les nœuds et les arêtes du réseau sont affichés dans une visualisation 3D comme des sphères et des lignes. L'architecture de CIMS utilise une approche à base d'agent afin de modéliser les éléments d'infrastructure, ses comportements et les relations existantes entre ses éléments. La principale caractéristique d'un agent est que chacun

d'entre eux subsiste comme une entité individuelle qui possède un état, des entrées, des règles de comportements qui agissent sur les entrées, modifient l'état ou produisent une sortie. Plusieurs modèles ont été développés pour certaines ICs telles que les systèmes électriques, les systèmes de transports, les réseaux informatiques, etc.

- **En 2007, CIMS** a été combiné à un algorithme génétique dans un modèle proposé par Permann dans (Permann, 2007) dans le but de chercher des moyens optimaux pour protéger les actifs d'infrastructure aux cas d'urgence. Cet algorithme consiste à effectuer, à partir d'un ensemble d'entités initialement défini, des simulations itératives durant lesquelles des fonctionnalités de ces entités peuvent être détruites ou altérées aléatoirement et d'évaluer le résultat avec une analyse comparative des caractéristiques des infrastructures avant et après ces simulations.

- **DIESIS KBS (2009)** : l'idée générale de l'approche proposée au sein du projet européen **EISAC** (Masucci, Adinolfi, Servillo, Dipoppa, & Tofani, 2009) est de développer un système à base de connaissances (Knowledge Base System KBS) basé sur l'ontologie de différentes ICs (infrastructure d'électricité, de télécommunication et de transport) et des règles sur lesquelles l'environnement de simulation fédérée **DIESIS** doit s'appuyer. Comme perspective, les auteurs ont proposé de construire un modèle coopératif principalement basé sur le paradigme des ontologies, capable de fédérer un ensemble de modèles dans un espace virtuel. Ce modèle va être utilisé dans des simulations de scénarios complexes impliquant différentes ICs.

### **I.6.3 Approches de simulation**

Afin d'étudier les caractéristiques dynamiques des ICs, il est nécessaire d'attribuer ces modèles à des simulateurs. Pour développer des outils de simulation des interdépendances de plusieurs infrastructures, actuellement, deux approches sont utilisées : l'approche d'intégration de modèles dans un modèle unifié et l'approche de fédération d'un ensemble de simulateurs déjà développés et qui traite chaque infrastructure individuellement.

#### **I.6.3.a Approche d'intégration de modèles**

Cette approche nommée aussi « approche from-scratch » consiste à développer de nouveaux simulateurs basés sur l'intégration de différents modèles d'ICs dans un seul modèle multi-infrastructures représentant les différentes ICs avec leurs interdépendances.

### I.6.3.b Approche de fédération de simulateurs

Dans le but de simuler plusieurs infrastructures collectivement, l'approche de fédération de simulateurs consiste à regrouper deux ou plusieurs simulateurs spécifiques aux ICs singulières et qui sont couramment utilisés afin de concevoir un environnement de simulation unifié et unique de multi-infrastructures. Cette approche est utilisée lorsqu'on veut faire des simulations très affinées et détaillées puisque les simulateurs combinés ont été développés afin d'être capables à couvrir et analyser la majorité des composants, des services et des besoins des ICs. Comme exemple :

- **FedABMS** : une méthodologie combine entre la modélisation et la simulation basée agents ABMS et la simulation fédérée pour étudier les interdépendances des ICs.

Cette mise en œuvre de l'ABMS a été proposée par (Casalicchio, Galli, & Tucci, 2007) dans le cadre du projet CRESCO de l'université de ROMA. Les auteurs ont développé la première implémentation d'un simulateur nommé **CIAB** (Critical Infrastructure Agent Based simulator) en utilisant l'architecture FedABMS sur un simple exemple d'un système d'information pour la gestion des urgences avec UML comme langage de modélisation. Ce modèle fusionne deux simulateurs, **e-AGORA** (un simulateur de réseau électrique) et **OMNeT++** (un simulateur de réseau de télécommunication) comme montrer dans la figure (I.5) (Casalicchio, Galli, & Tucci, 2007).

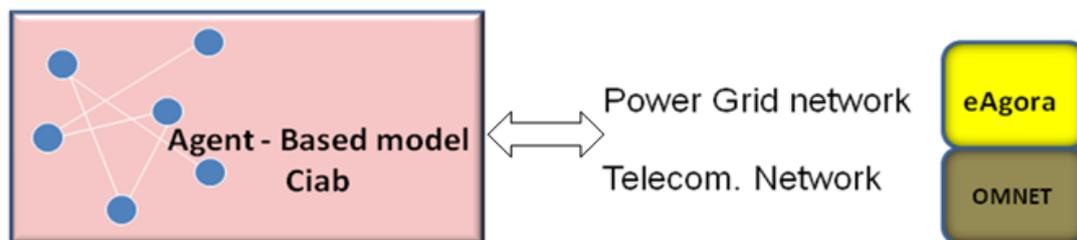


Figure I.5. Modèle de fédération de simulateurs

En utilisant cette approche, chaque infrastructure est représentée par un agent (classe java) tel que CIAB utilise **Repast** pour la simulation de ces agents.

## I.7 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté le domaine de protection et gestion des infrastructures critiques interdépendantes dans sa généralité. Dans un premier temps, nous avons parlé des différents secteurs des ICs, leurs problèmes d'interdépendance et l'ensemble des risques liés à leur sécurité. Puis, on a défini la démarche d'évaluation et gestion de ces risques. Dernièrement, les différents méthodes et approches de modélisation et simulation ont été exposé avec un certain nombre de travaux connexes.

Dans le chapitre qui suit, nous allons prendre l'exemple de dépendance entre les infrastructures hospitalières et celles d'électricité. Ces deux infrastructures sont jugées très importantes pour le bien être socio-économique des sociétés et présentent l'étude de cas de notre travail de recherche. On va parler particulièrement sur la gestion du réseau électrique, les causes et les conséquences d'avoir une défaillance électrique au sein des hôpitaux ainsi que sur la planification de la gestion des risques électriques dans les établissements de santé.

# Chapitre II

---

## **Gestion du réseau électrique dans les infrastructures hospitalières**

## SOMMAIRE

---

II.1 Introduction-----	34
II.2 Importance de l'électricité dans les hôpitaux -----	35
II.2.1 Secteurs alimentés par l'électricité -----	35
II.2.1.a Eclairage -----	35
II.2.1.b Equipements -----	35
II.2.2 Criticité des activités médicales aux coupures électriques -----	36
II.3 Sources d'alimentation électrique-----	38
II.3.1 Source d'alimentation normale-----	38
II.3.2 Source d'alimentation alternative-----	38
II.4 Origines des ruptures d'électricité-----	39
II.4.1 Causes d'origines externes-----	39
II.4.2 Causes d'origines internes -----	40
II.5 Impacts de la défaillance du réseau électrique -----	40
II.6 Défaillance du système d'alimentation alternative : causes et conséquences -----	41
II.7 Sûreté de fonctionnement des installations électriques -----	42
II.8 Planification de la gestion des risques électriques -----	43
II.8.1 Préparation à la gestion d'un risque électrique-----	43
II.8.2 Gestion des risques électriques -----	44
II.8.2.a Analyse des risques électriques -----	44
II.8.2.b Réduction des risques électriques-----	45
II.8.2.c Communication sur le risque électrique -----	45
II.8.3 Paramètre déterminant dans la gestion de risque-----	46
II.9 Discussion et conclusion-----	46

---

## II.1 Introduction

La plupart des infrastructures critiques sont étroitement dépendantes du réseau de distribution électrique dont le bon fonctionnement et la stabilité contribuent énormément dans la protection de la qualité de performance et la sécurisation de ces dernières. Par ailleurs, toute panne de courant électrique peut causer des pertes économiques incommensurables (Rose, Oladosu, & Liao, 2007; Farrell, Zeriffi, & Dowlatabadi, 2004) qui sont parfois associées à des pertes humaines tel que dans le cas des infrastructures hospitalières qui constituent justement l'objectif de ce chapitre.

La sûreté de fonctionnement du secteur sanitaire est de ce fait, fortement conditionnée par l'efficacité des mesures entreprises à l'égard des éventuelles défaillances dans le réseau électrique. Il est important de noter que, même si les impacts sur le secteur de santé sont limités à une partie restreinte de la population, les effets peuvent être néfastes pour cette partie.

Malgré le nombre d'hôpitaux qui ont connu des pannes d'électricité est assez important (Manley, et al., 2006), les auteurs dans la référence (Prezant, et al., 2005) ont constaté que les travaux de recherches sur les effets d'une telle défaillance restent très modestes. Ces pannes peuvent être causées par une variété d'événements ayant chacun des impacts spécifiques sur le secteur de santé (Milsten, 2000).

Afin de renforcer la résilience des établissements de santé et de réduire les impacts possibles des pannes d'électricité, une gestion globale, efficace et bien structurée des risques est nécessaire.

Ce chapitre s'attache notamment aux infrastructures hospitalières et aux réseaux électriques associés et qui sont d'une importance majeure pour son bon fonctionnement en commençant par définir l'importance et les secteurs alimentés par l'électricité dans les établissements de santé. Puis, on parle sur les différentes sources d'alimentation électrique. Ensuite, nous présentant les causes de la défaillance du réseau électrique et leurs impacts sur les fonctions et les patients de l'établissement. Enfin, on définit les démarches de sûreté de fonctionnement des installations électriques et de la gestion des risques électriques que les établissements de santé adoptent et pratiquent contre la survenue des pannes électriques.

## II.2 Importance de l'électricité dans les hôpitaux

Vu l'importance des différents services médicaux, à caractères d'urgence, offerts par le secteur sanitaire et qui sont généralement assurés 24h/7J, celui-ci compte parmi les composantes les plus délicates de la structure socio-économique de chaque pays. De ce fait, les responsables de telles infrastructures ne peuvent, en aucun cas, tolérer la survenue de problèmes qui puissent altérer le bon déroulement de leurs activités. La performance de ce secteur repose, au fait, sur de nombreux critères dont celui de l'efficacité du réseau électrique du fait que l'éclairage ainsi que tous les équipements médicaux en dépendent. On pourrait citer comme exemple les patients sous appareillage aux soins intensifs ou celui d'un patient subissant une opération chirurgicale à l'intérieur du bloc opératoire. Ces derniers n'ont aucune chance de survivre à une panne électrique. Ainsi, la disponibilité permanente de l'électricité est une nécessité incontournable pour le bon fonctionnement quotidien des hôpitaux. Pour ce faire, presque tous les hôpitaux se sont prémunis par des générateurs de secours capables de se déclencher immédiatement en cas de coupure électrique et d'éviter ainsi toute perte de vie humaine ou de produits médicaux.

### II.2.1 Secteurs alimentés par l'électricité

Les principaux secteurs alimentés par l'électricité dans un hôpital sont : l'éclairage et les équipements

#### II.2.1.a Eclairage

L'éclairage est réparti en trois catégories :

- Eclairage interne.
- Eclairage spécifique.
- Eclairage extérieur.

#### II.2.1.b Equipements

Les équipements alimentés en électricité peuvent-être répartis selon les grandes catégories présentées dans le tableau (II.1).

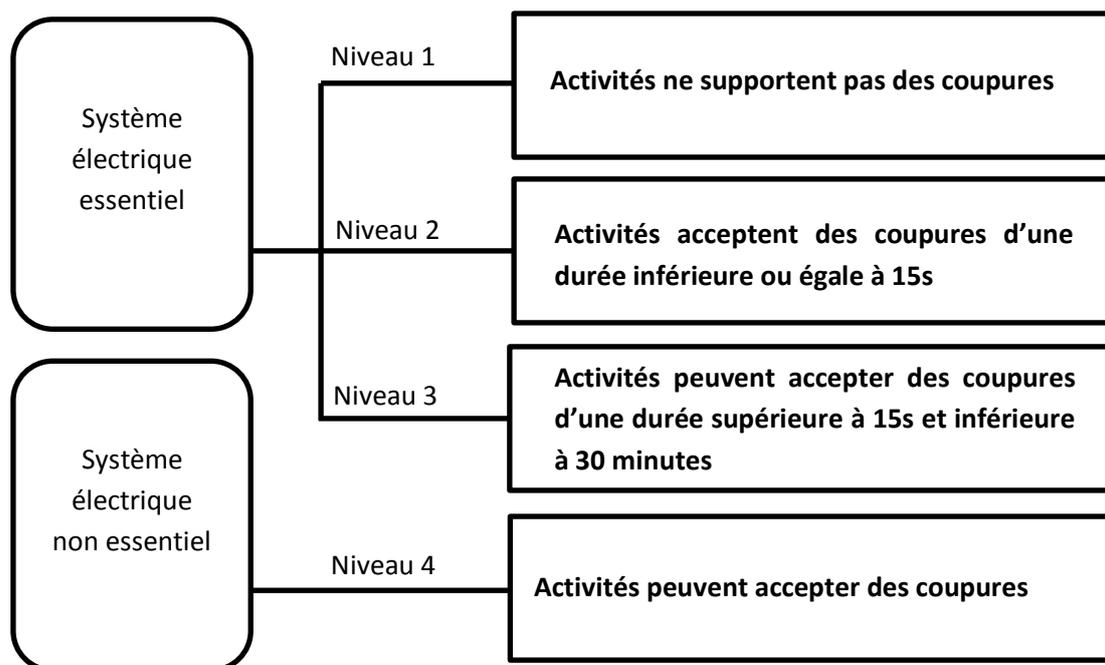
**Tableau II.1. Equipements alimentés en électricité**

Type d'équipement	Exemple
<b>Equipements de l'établissement</b>	Chauffage, ventilation, climatisation et réfrigération Transport (ascenseurs, escaliers électriques, chariots) Pompes auxiliaires (incendie, puisard, air clinique et aspirateurs, tubes pneumatiques).
<b>Equipements fonctionnels</b>	Cuisine, systèmes de communication et d'informatique, système de gestion des matériaux et des dossiers médicaux.
<b>Equipements médicaux</b>	Systèmes à rayons X et d'imagerie, radiothérapie, les laboratoires, service de chirurgie, soins intensifs et les urgences, pharmacie.

## II.2.2 Criticité des activités médicales aux coupures électriques

Le système de distribution électrique pour les hôpitaux est essentiellement divisé en deux sous-systèmes comme suit selon la criticité des activités médicales :

- **Système électrique essentiel** : assure la continuité du service électrique aux activités médicales considérées très essentielles à la sécurité de la vie, les soins intensifs des patients, et le fonctionnement efficace de l'établissement de santé. D'après (Chtiha , Aboulay , Assier , & Cardinale, 2008), ces activités sont classées en trois niveaux de criticité selon le temps de coupure admissible pour l'alimentation de ces activités comme illustré sur la figure (II.1).
- **Système électrique normale (non essentiel)** : assure la continuité du service électrique aux activités considérées non essentielles à la sécurité de la vie ou à l'efficacité du fonctionnement essentiel de l'établissement de santé. Ces activités présentent le dernier niveau de criticité comme présenter dans la figure (II.1).



**Figure II.1.** Criticité des activités médicales aux coupures électriques

- **Niveau 1** : dédié pour les secteurs hospitaliers critiques dont l'alimentation électrique doit être assurée quoi qu'il arrive et qui n'autorisent aucune coupure ; on peut citer les blocs opératoires, la réanimation, l'imagerie interventionnelle, les unités de soins intensifs, etc...

- **Niveau 2** : dédié aux secteurs sensibles qui peuvent supporter des coupures n'excédant pas 15 secondes. A l'exemple de la salle de surveillance post interventionnelle, l'hémodialyse, la chambre froide pour la conservation des produits sanguins.

- **Niveau 3** : concerne les secteurs pouvant supporter des interruptions d'alimentation électrique allant de 15 secondes à 30 minutes sans faire courir de risques ni aux patients, ni au personnel : les salles d'attente, les cuisines, les locaux administratifs, les systèmes d'alarme et d'alerte, les systèmes de télécommunications qui sont utilisés pour donner des instructions dans des conditions d'urgence, etc...

- **Niveau 4** : concerne les systèmes électriques non essentiel qui se composent d'équipements et de circuits qui fournissent l'électricité à partir de l'alimentation normale à des activités qui ne sont pas considérées comme essentielles à la sécurité de la vie ou à l'efficacité du fonctionnement essentiel de l'établissement de santé. On peut citer comme exemples l'éclairage général, les équipements du laboratoire général, les équipements des services non-critiques, etc...

## **II.3 Sources d'alimentation électrique**

En général, tel que présentées sur la figure (II.2), les sources d'énergie qui peuvent être utilisés dans les réseaux électriques des établissements de santé sont les suivantes :

### **II.3.1 Source d'alimentation normale**

La source d'alimentation normale peut être l'un des éléments suivants :

- Utilitaires électriques d'alimentation
- Générateur(s) de puissance sur site et dans ce cas, la source d'alimentation de secours nécessaire peut être un autre générateur d'énergie ou un utilitaire électrique.

### **II.3.2 Source d'alimentation alternative**

Chaque hôpital devrait également avoir une source alternative fiable d'énergie pour l'éclairage de secours et le fonctionnement de l'équipement essentiel en cas de pannes de courant. La source d'alimentation de remplacement peut être constituée d'un ou plusieurs groupes électrogènes ou batteries de secours.

Dans le cas normal, les systèmes électriques essentiel et non essentiel sont alimentés par la source d'alimentation normale ; cependant, le système électrique essentiel peut être transféré à la source d'alimentation alternative à chaque fois que la source d'alimentation normale subit une panne de courant comme illustré dans la figure (II.2) pour assurer l'alimentation électrique des activités de criticité de niveau 1,2 et 3.

Dans le cas où la source de remplacement est composée de plusieurs générateurs, la défaillance de l'un d'entre eux ne doit pas affecter le fonctionnement des autres et la puissance encore disponible doit-être suffisante pour couvrir le besoin en énergie de l'ensemble des activités surtout celles classées niveau 1 et 2.

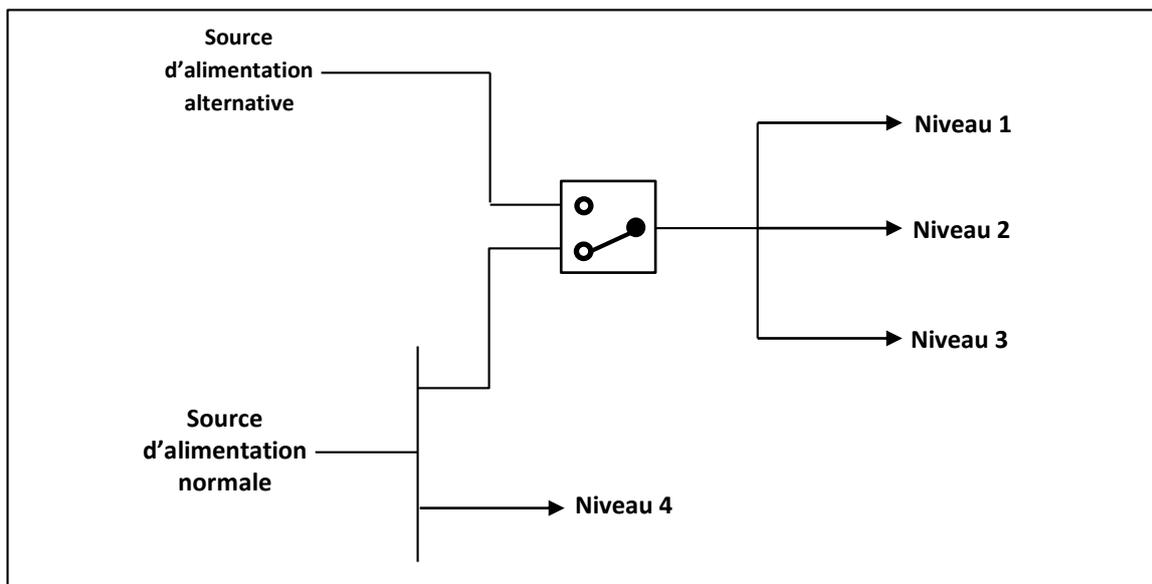


Figure II.2. Sources d'alimentation dans les établissements de santé

## II.4 Origines des ruptures d'électricité

Les causes des ruptures d'électricité dans les établissements sanitaires peuvent être externes ou internes (Protection sociale, 2009):

### II.4.1 Causes d'origines externes

Les ruptures d'alimentation électrique, qui peuvent être générales ou localisées, peuvent être d'origines très variées :

- Techniques : c'est le cas de pannes majeures atteignant tout ou une partie du territoire et qui sont dues en général à un déséquilibre production/consommation.
- Climatiques : tels que les coups de vents causant la chute d'arbres sur le réseau électrique aérien, les inondations affectant un réseau électrique souterrain non protégé et parfois même la canicule ou le grand froid obligeant à faire des délestages pour assurer la fourniture d'énergie aux secteurs prioritaires.
- Accidentelles : très variées tel que les émissions massives de gaz et les incendies qui exigent l'arrêt immédiat de l'alimentation électrique.
- Terroristes : relatives à la sécurité du territoire.

## II.4.2 Causes d'origines internes

Relatives à la vétusté des installations électriques appelant une mise aux normes.

## II.5 Impacts de la défaillance du réseau électrique

Les impacts d'une panne électrique sur les établissements de santé peuvent différer considérablement d'un sous-secteur à un autre et d'un service à un autre au sein d'un même sous-secteur, lorsque les degrés de criticité qui les caractérisent diffèrent. Ces effets peuvent être directs ou indirects et se distinguent selon la durée de la panne (Hiete, Merz, & Schultmann, 2011).

Les impacts directs incluent la rupture des dispositifs médicaux tels que les équipements de diagnostic ainsi que la défaillance des installations de services médicaux et de l'infrastructure du bâtiment hospitalier, y compris les systèmes d'éclairage, les ascenseurs et les systèmes de sécurité. De tels impacts peuvent provoquer de graves perturbations dans les processus de soins normaux.

En revanche, les impacts indirects sont causés par la perturbation des infrastructures externes à travers, par exemple, l'interruption des différents services publics en relation avec l'hôpital (télécommunications, transports, approvisionnement...), ou une subite augmentation du nombre de patients hospitalisés. Ces derniers, sont étroitement dépendants du temps et sont de plus en plus sévères lorsque la coupure de courant perdure.

Les impacts peuvent être graves et même posent un danger sur la vie surtout si les salles d'opération (Carpenter & Robinson, 2010); ou les unités de soins intensifs (O'hara & Higgins, 1992) sont touchés. Il y a plusieurs articles (Prezant, et al., 2005; Klein, osenthal, & Klausner, 2005; Eachempati, Mick, & Barie, 2004; Milsten, 2000; Norcross, Elliott, Adams, & Crawford, 1993; O'hara & Higgins, 1992); dont la plupart de leurs études de cas étaient au sujet de la défaillance des dispositifs médicaux tels que les ventilateurs, compresseurs d'oxygène, dialyse, pompes à ballon intra-aortique, pompes à perfusion, les moniteurs, l'activation du système de traumatologie et les appareils de radiologie au cours d'une panne d'électricité.

## II.6 Défaillance du système d'alimentation alternative : causes et conséquences

Bien que la mise en place de systèmes d'alimentation alternatifs de longues durées dans les hôpitaux soit indispensable pour préserver la continuité des services vitaux en cas de panne électrique, ces derniers peuvent eux-mêmes être dans un état défaillant lors de leur mise en service. Un exemple concret d'une telle situation a été présenté par les auteurs dans les références, (Beatty, Phelps, Rohner, & Weisfuse, 2006; Arboleda, Abraham, Richard, & Lubitz, 2009) où ils ont signalé que, lors d'un ouragan, les groupes électrogènes de secours, installés dans des endroits exposés au risque d'inondation, n'ont pas pu fonctionner. Un autre témoignage dans les références (Prezant, et al., 2005; Norcross, Elliott, Adams, & Crawford, 1993) confirme la neutralisation totale du système d'alimentation de secours lorsque le réservoir de carburant est vide au moment de la panne électrique ou lorsque la quantité de carburant est insuffisante pour couvrir la durée totale de la défaillance électrique.

De plus, dans certains cas, ce système d'urgence, à cause de sa faible puissance ou de l'importance des infrastructures de l'hôpital, n'est connecté qu'aux services critiques. Par conséquent, des services tels que les ascenseurs, les systèmes de chauffage et de refroidissement, la lingerie, la cuisine, les routeurs informatiques, les systèmes de communication et parfois même, certains équipements médicaux sont déconnectés des générateurs de secours (Klein, osenthal, & Klausner, 2005; Chaffee, 2005; Brown, 2004; Eachempati, Mick, & Barie, 2004; Wideman, 2004; Hargrove, Ramish, O'Donnell, & Aherne, 2002; Milsten, 2000). D'après la classification de Vangerud dans la référence (Vangerud, 2003), on distingue trois types d'équipements : les équipements critiques, les équipements de sécurité de la vie de priorité moins importante et les équipements qui peuvent être débranchés si nécessaire, par exemple dans le cas où l'alimentation d'urgence ne répond pas à la demande. Parmi ces équipements on retrouve ceux des systèmes de communication dont l'impact d'une panne électrique diffère selon le type de la communication ; on retrouve les communications intra-hospitalière (téléphone, système informatique), la communication avec les ambulanciers, la communication externe avec les parties prenantes et les appels d'urgence (Oh, Deshmukh, & Hastak, 2010; Klein, osenthal, & Klausner, 2005; Eachempati, Mick, & Barie, 2004; Brown, 2004).

Une défaillance du système informatique de l'hôpital a des conséquences graves ce qui signifierait, pas d'accès aux données du dossier médical électronique du patient y compris

l'historique du dosage des médicaments, de radiologie et des résultats du laboratoire (Klein, osenthal, & Klausner, 2005; Brown, 2004; Eachempati, Mick, & Barie, 2004). La communication par téléphone est également affectée. Les circuits de téléphone cellulaire peuvent être facilement surchargés si la demande augmente (Eachempati, Mick, & Barie, 2004).

## II.7 Sureté de fonctionnement des installations électriques

Seule l'application d'une démarche permanente de sûreté de fonctionnement permettrait au système d'alimentation électrique d'être résilient, fiable et capable de résister aux événements les plus imprévisibles (notamment les aléas climatiques, le vol, le vandalisme...) et d'assurer théoriquement zéro coupure dans les zones de criticité de niveau1 (blocs opératoires, réanimation, urgences, soins intensifs, etc.). Cet objectif peut être réalisé (Assistance publique - Hopitaux paris, 2005) en suivant les consignes suivantes :

### 1) Adopter l'une des règles suivantes :

- Disposer de deux alimentations électriques normales assurées au moyen de deux câbles d'alimentation indépendants et d'une source autonome de remplacement interne à l'établissement ;
- Disposer d'une alimentation électrique normale assurée au moyen d'un seul câble d'alimentation et de deux sources autonomes de remplacement. La seconde source de remplacement prend le relais de la première en cas de défaillance de celle-ci.

### 2) Respecter les normes de maintenance :

Les incidents recensés ces dernières années mettent souvent l'état de fonctionnement des éléments constitutifs des installations électriques interne de l'hôpital qui sont très souvent soumis à une maintenance préventive insuffisante et irrégulière. Afin de contourner ce problème, il faudrait exiger au personnel technique, à qui incombe cette tâche, d'être efficace et très vigilant et de respecter l'ensemble des normes qui régissent l'entretien des installations électriques hospitalières. Ceci peut être assuré en suivant les instructions suivantes (Assistance publique - Hopitaux paris, 2005) :

- ✓ Les deux dispositifs d'alimentation électrique normal et alternatif doivent tous les deux subir périodiquement des évaluations et faire l'objet d'une maintenance régulière de haute qualité.

- ✓ Ces mêmes dispositifs doivent être testés selon des essais à périodicité régulière et conformément aux préconisations des constructeurs. En tout état de cause, le délai entre deux essais ne doit pas excéder un mois.
- ✓ Deux fois par an, des tests durcis (charge plus importante sur une durée plus longue) devront être réalisés. Ceci permettrait de vérifier la capacité des installations de secours à fournir la totalité de la charge des services prioritaires. Ces essais doivent être réalisés dans les conditions réelles de fonctionnement de l'alimentation électrique de secours, en simulant une coupure de l'alimentation électrique normale. Lorsqu'une défaillance partielle ou complète est constatée lors des essais d'un dispositif de secours électrique, des mesures correctives doivent être prises immédiatement afin que ce dispositif retrouve sa fonction initiale.

## **II.8 Planification de la gestion des risques électriques**

Afin de renforcer la résilience des établissements de santé vis-à-vis des impacts des pannes d'électricité et ses effets secondaires ou indirects, une gestion globale et bien structurée des risques électriques est nécessaire.

### **II.8.1 Préparation à la gestion d'un risque électrique**

La gestion du risque électrique s'inscrit dans le cadre des mesures indispensables à prendre lors d'une crise électrique au sein d'un établissement de santé. Cette gestion ne peut être efficace et bénéfique que si elle est bien préparée au préalable à travers le rassemblement de toutes les données ainsi les consignes d'ordre générales et leurs mises à la disposition immédiate des établissements sanitaires (Assistance publique - Hopitaux paris, 2005). On peut citer notamment :

- Le plan détaillé de l'ensemble des services de l'établissement médical ainsi que les activités correspondantes par ordre de criticité ;
- L'identification complète et l'emplacement de tous des dispositifs électriques de secours mis en place (onduleurs, groupes électrogènes)
- Des informations précises sur les capacités temporelles minimales et maximales des différents dispositifs de secours (durée de fonctionnement de chaque onduleur, durée de fonctionnement des groupes électrogènes sans ravitaillement en carburant) ;
- La liste, régulièrement mise à jour, des moyens techniques à la disposition de l'établissement ainsi que leurs localisations.

- La liste, régulièrement mise à jour, des ressources humaines incluant toutes les données personnels (e-mails, numéros de téléphone, domaines et compétences, adresse...)
- La liste des fiches « conduite à tenir » à diffuser aux personnels concernés et à mettre en œuvre lors du déclenchement de la panne électrique. Ces fiches qui sont préparées au préalable contiennent des instructions et des conseils pratiques adaptés aux différentes situations qui pourraient survenir lors d'une crise électrique. Des exercices périodiques doivent être organisés pour bien maîtriser le plan d'actions, les moyens déployés ainsi que les emplacements des différentes structures. Cette procédure permet une identification plus rapide de la panne et, donc, une bonne organisation de la gestion du risque.

## **II.8.2 Gestion des risques électriques**

En générale, lorsqu'une panne de courant, déclenchée à la suite d'un certain événement, devient hors de contrôle, la gestion des risques est automatiquement entreprise à travers trois étapes successives : l'analyse des risques (identification et évaluation), la réduction des risques et la communication des risques (Leitch, 2010; Purdy, 2010).

### **II.8.2.a Analyse des risques électriques**

Dans cette étape, on commence avant tout par identifier tous les risques que peut engendrer la coupure d'électricité sur le réseau électrique interne (vétusté des installations...) et externe (panne générale, localisée...) ainsi que les risques encourus par les patients, le personnel et les produits susceptibles d'être endommagés (sang, vaccins, médicaments...). Ensuite, on doit impérativement enchaîner avec une évaluation de la gravité des conséquences imposées par l'arrêt des activités au niveau des différents services hospitaliers. Enfin, il faudrait établir les priorités et déterminer en conséquence les besoins en énergie pour les cas vitaux ou critiques (Direction Générale de l'Action Sociale, 2009).

Il faut noter, qu'un dysfonctionnement au sein d'un service quelconque, nécessite une prise de décision immédiate et précise qui prendrait en compte les défaillances de l'ensemble des deux éléments, interne et externe, du réseau électrique de l'établissement. Cependant, lorsque les différentes phases d'un incident électrique ne sont pas prévisibles, il est indispensable de d'intervenir en travaillant sur des protocoles, des conduites à tenir et des simulations. L'acquisition de règles individuelles et collectives est essentielle dans ce type de situation.

### II.8.2.b Réduction des risques électriques

Dans cette deuxième étape, il convient de déterminer les moyens à mettre en œuvre pour réduire les risques. Pour cela, plusieurs voies sont possibles :

- Déterminer comment assurer la puissance électrique nécessaire (acquisition d'un groupe électrogène en poste fixe, location ou mutualisation d'un groupe électrogène, achat d'énergie à un particulier...).
- Lister les fonctions/activités à maintenir en priorité, celles à assurer en mode dégradé et celles à arrêter.
- Déterminer les mesures organisationnelles et techniques nécessaires (répartir les responsabilités, formation et habilitation du personnel pour le branchement du groupe, annuaire de crise, mise aux normes, maintenance préventive...).
- Formaliser les procédures (regroupement des personnes en vue de leur confort thermique, organisation d'une surveillance accrue pour les personnes alitées ou largement dépendantes, gestion des stocks de denrées alimentaires, basculement des dispositifs médicaux sur les batteries de secours, transfert de patients...).
- Passer les conventions de coopérations dans le cas d'une mutualisation ou d'un partage et réaliser les contrats avec les fournisseurs (groupe électrogène, portage des repas, sous-traitance du traitement du linge, ...).

### II.8.2.c Communication sur le risque électrique

En dernière étape, il est nécessaire de définir les modalités de sensibilisation du personnel, des résidents et des familles, des partenaires, des autorités de tarification sur les risques encourus en cas de coupure d'électricité, dans le cadre de la communication préventive, et dans celui de la communication de crise (en cas de rupture effective de l'alimentation).

Le guide spécifique de la gestion de crise électrique doit être connu de l'ensemble du personnel. Un exemplaire actualisé sera à disposition dans la salle dédiée à la gestion de crise, avec les autres plans et références (comme le plan blanc) conservés dans une armoire sécurisée. Il sera accompagné d'un document confidentiel recensant l'ensemble des circuits, réseaux, et

installations de l'établissement. Il contiendra également les numéros de téléphones actualisés utiles, une fiche synthétique indiquant les décisions à prendre immédiatement et les coordonnées des ressources internes et externes pouvant apporter expertise, assistance et contribution en de telles circonstances. Ce document doit permettre de trouver immédiatement les grandes règles de conduite utiles pour être opérationnel (Assistance publique - Hopitaux paris, 2005)

### **II.8.3 Paramètre déterminant dans la gestion de risque**

Le fait de prédéfinir les tâches qui incombent à chacune des trois étapes de gestion de risque citées précédemment, reste insuffisant et sans grand intérêt si leurs exécutions ne puissent pas atteindre l'objectif derrière leur existence même, dans le plan d'actions, au moment de la panne électrique. Au fait, le facteur le plus important dans ce contexte reste, tout d'abord et de loin, le temps d'exécution des différentes manœuvres à entreprendre dans chacune de ces étapes. En conséquence, il est impératif de réduire au maximum ce paramètre ou, en d'autres termes, de l'optimiser tout en se fixant comme principale but de sauver le maximum de vies humaines. D'autre part, les incertitudes et imprécisions rencontrées lors de l'exécution de ces étapes, et surtout au début, doivent être également réduites au maximum. Ceci ne peut être réalisé qu'en se dotant d'emblée de moyens plus adéquats utilisant les techniques de gestion et de communication parmi les plus récentes. De plus, l'analyse des différents scénarios entrepris dans chaque étape doivent être prescriptifs et adaptatifs afin de faciliter et d'améliorer le déroulement des événements du processus de gestion de risque.

## **II.9 Discussion et conclusion**

Dans ce chapitre nous avons tout d'abord illustré les différentes composantes du réseau électrique hospitalier, tout en soulignant le rôle et l'importance des générateurs de secours. Ensuite, nous avons présenté une étude détaillée des causes de la défaillance des installations électriques ainsi que leurs impacts sur les différents services de l'hôpital et plus spécifiquement sur les patients des services critiques. Cette étude a été accompagnée par l'établissement de l'ensemble des démarches nécessaires pour empêcher de telles défaillances et assurer la sûreté de fonctionnement de ces installations. Finalement, nous avons présenté les différentes étapes que les responsables d'un hôpital devraient entreprendre dans la gestion des risques électriques.

Malgré les démarches de sûreté de fonctionnement des installations électriques au sein des établissements de santé grâce à l'intégration de groupes électrogènes et malgré les plans d'actions préétablis pour contrecarrer leurs éventuels dysfonctionnements à travers les trois étapes de gestion déjà citées, les établissements sanitaires sont souvent confrontés au pire des cas. En effet, des événements recensés dans plusieurs hôpitaux à travers le monde, comme il sera illustré en détail dans le prochain chapitre, montrent que la probabilité que les systèmes électriques de secours, en cas de besoin, soit hors service ou incapable de couvrir le minimum d'énergie électrique requis par les services critiques, est assez conséquente. Le dysfonctionnement de ces sources de secours en un moment pareil, place les hôpitaux dans une situation vraiment très délicate qui les oblige à prendre la décision d'évacuation de tous les patients affectés. La plupart de ces patients sont soumis à des soins aigus, continus et parfois intensifs sous appareillage médical électrique, ce qui nécessite une évacuation dans des conditions plus particulières selon des scénarios différents de ceux des malades capables d'être évacués par eux-mêmes. Étant donné que la recherche dans le domaine d'évacuation dans les hôpitaux est limitée (Chen, Guinet, & Ruiz, 2015), notre travail s'inscrit, justement, dans la recherche de solutions efficaces liée à cette problématique et qui vise plus particulièrement celle causée par la défaillance du réseau électrique y compris les systèmes de secours.

Dans le chapitre suivant, seront recensés tous les problèmes d'évacuation des patients d'un hôpital affecté par une panne électrique dans le but de modéliser et améliorer la gestion des interventions d'urgence du processus d'évacuation à travers le développement d'un système d'aide à la gestion des interventions d'urgence. Ce système est destiné à différentes parties prenantes impliquées dans le processus d'évacuation afin de faciliter leurs travaux et améliorer la qualité de leurs communications et réduire la taille des dégâts et du temps nécessaire.

## **Chapitre III**

---

# **Système d'Aide à la Gestion des Interventions d'Urgence (SAGIU) : Description & Modélisation**

## SOMMAIRE

---

III.1 Introduction-----	50
III.2 Littérature sur l'évacuation des hôpitaux -----	50
III.3 Cas réels de pannes électriques dans les hôpitaux-----	53
III.4 Processus de la prise de décision d'évacuation -----	55
III.5 Problèmes d'évacuation à la suite d'une panne électrique -----	57
III.5.1 Problèmes Avant l'évacuation -----	58
III.5.2 Problèmes durant l'évacuation -----	59
III.5.3 Problèmes après l'évacuation-----	59
III.6 Système d'aide à la gestion des interventions d'urgence (SAGIU) -----	60
III.6.1 Description du SAGIU -----	60
III.6.2 Sous processus du SAGIU -----	61
III.6.2.a Sous processus de déclenchement de l'alerte (SP1)-----	62
III.6.2.b Sous processus d'identification des patients à évacuer (SP2) -----	63
III.6.2.c Sous processus de priorisation des patients (SP3)-----	63
III.6.2.d Sous processus de préparation des patients (SP4)-----	65
III.6.2.e Sous processus de transport des patients (SP5)-----	66
III.6.3 Agents intervenants du SAGIU-----	68
III.6.3.a Agents intervenants avant la panne -----	68
III.6.3.b Agents intervenants pour décider et lancer le processus d'évacuation -----	68
III.6.3.c Agents intervenants pour appliquer le processus d'évacuation -----	69
III.6.4 Modélisation et simulation prescriptive du SAGIU -----	70
III.6.4.1 Scenarios prescriptifs-----	70
III.7 Conclusion -----	73

---

### **III.1 Introduction**

Dans le cas d'une panne électrique partielle ou générale dans une infrastructure hospitalière, l'enjeu le plus important est de réussir à sécuriser au maximum la vie des patients, surtout ceux qui sont totalement dépendant des systèmes électriques ; ceci oblige l'hôpital, dans certain cas, à prendre la décision d'évacuation des patients concernés.

Le point critique dans une telle situation est la mise en place d'une gestion efficace des interventions d'urgence du processus d'évacuation, qui assure une bonne communication entre les différentes parties prenantes impliquées et qui évite le désordre, la panique et la perte de temps. Cette idée a été concrétisée dans le présent chapitre à travers le développement d'un Système d'Aide à la Gestion des Interventions d'Urgence (SAGIU) du processus d'évacuation basé sur la création de scénarios prescriptifs et adaptatifs de simulation.

Ce chapitre est subdivisé en plusieurs parties. Dans la première partie, est présentée une littérature détaillée sur les différents travaux de recherche traitant les problèmes d'évacuation des hôpitaux. Dans la deuxième partie, sont cités plusieurs cas réels de pannes électriques survenu dans différents hôpitaux à travers le monde et qui ont nécessité l'évacuation de leurs patients. Dans la troisième partie, sont définies les étapes essentielles du processus de prise de décision d'évacuation. Dans la quatrième partie, les principaux problèmes d'évacuation à la suite d'une panne de courant sont exposés. La dernière partie présente la description et modélisation de notre SAGIU proposé.

### **III.2 Littérature sur l'évacuation des hôpitaux**

De nombreux incidents sont susceptibles d'entraîner une évacuation des hôpitaux. Les travaux de recherche qui se sont penchés sur cette problématique ont été élaborés en fonction de la nature de l'incident causant l'évacuation. On peut citer notamment les travaux accomplis et présentés dans (Tayfur & Taaffe, 2007 ; Adalja, et al., 2014; Taaffe, Johnson, & Steinman, 2006; Tayfur & Taaffe , 2009a) dédiés aux hôpitaux frappés par un ouragan, dans (Burgess, 1999) pour les hôpitaux exposés à des produits chimiques ou des matières dangereuses, dans (Johnson, 2006 ; De-Ching, et al., 2011) se basant sur le cas d'incendies, dans (Blaser & Ellison, 1985) concernant le cas d'inondations, dans (Augustine & Schoettmer, 2005) en cas d'actes terroristes ou de bombardement, dans (Vugrin, Verzi, Finley, & Turnquist, 2015 ;

Kader, 2008) où sont évoqués les pannes électriques et finalement dans (Niwa, Okaya, & Takahashi, 2015; Schultz, Koenig, & Lewis, 2007 ; Kobes, Helsloot, de Vries, & Post, 2010; Sokhansefat, Delavar, & Banedj-Schafii, 2012; Shi, Ren, & Chen, 2009; Liu, et al., 2013 ) où on parle du séisme comme cause d'évacuation.

Un outil de collecte de données normalisé a été développé dans (Rinne, Tillander, & Gronberg, 2010 ) pour consigner les informations d'évacuation des hôpitaux d'une manière systématique. Dans (Wabo, Ortenwall, & Khorram-Manesh, 2012), les auteurs ont proposé une étude visant à évaluer la nécessité d'un plan d'évacuation dans les hôpitaux et la façon de le concevoir tout en soulevant de nombreuses questions et problèmes. Ils ont conclu que la planification devrait se baser sur une analyse continue des risques et de la vulnérabilité et devrait consister d'une bonne communication, d'une logistique fonctionnelle et d'opportunités de formations.

Certains problèmes et complexités d'évacuation des hôpitaux ont été citées dans la référence (Taaffe, Kohl, & Kimbler, 2005). Dans cette dernière, les auteurs ont décrit tout d'abord les problèmes inhérents à la planification et à l'évaluation ainsi que la complexité de la construction des modèles appropriée à la préparation et l'évacuation en situation d'urgence. En second lieu, les auteurs dans (Taaffe, Kohl, & Kimbler, 2005) ont abordé la stratégie d'évacuation ; plus précisément ils ont procédé à l'élaboration d'un plan d'évacuation (y compris la décision d'évacuation) puis à son évaluation pour son raffinement et son amélioration. Une autre contribution de Sharmin Kader dans (Kader, 2008), qui a présenté le développement d'une stratégie de conception pour les établissements hospitaliers afin de soutenir le processus complet d'évacuation.

Dans la référence (Golmohammadi & Shimshak, 2011), un modèle de prédiction a été établi pour estimer le temps d'évacuation dans une situation d'urgence dans les hôpitaux. Ce modèle a été suffisamment générique pour être utilisé dans divers milieux hospitaliers. Le principal avantage de ce modèle est son temps de calcul très court, d'autant plus que celui-ci n'a pas besoin d'une conception longue et coûteuse. Les auteurs de la référence (Tayfur & Taaffe, 2009b) quant à eux, ils ont étudié l'influence de la circulation routière sur l'évacuation de l'hôpital. Ils ont présenté un modèle stochastique par simulation pour traiter un événement d'évacuation préalable tel qu'un ouragan. Dans (Tayfur & Taaffe, 2009a), les mêmes auteurs ont proposé un modèle pour l'allocation des ressources pendant les évacuations hospitalières. En outre, ils ont présenté une approche d'optimisation déterministe pour identifier les besoins

en personnel et en moyens de transport, ainsi que la planification de ces exigences, dans un délai d'évacuation pré-spécifié tout en minimisant les coûts.

De nombreux travaux de recherche ont présenté des modèles de simulation pour l'aide à l'évacuation de l'hôpital. Dans la référence (Taaffe, Johnson, & Steinman, 2006) a été développé un modèle de simulation et l'analyse initiale pour l'évaluation de l'efficacité d'un plan d'évacuation étant donné différents scénarios et ressources. Ce modèle utilise des renseignements sur les ressources nécessaires pour fournir des données sur le temps d'évacuation qui peuvent aider les gestionnaires de risques à prendre des décisions concernant les plans d'évacuation de leur hôpital. Les auteurs dans (Tayfur & Taaffe, 2007) ont proposé un modèle de simulation qui peut être utilisé par les hôpitaux pour évaluer leurs performances en cas d'évacuation à la suite d'un ouragan. Dans (Mikulik, Cempel, Kracik, & Dabal, 2014), un modèle de simulation d'une évacuation d'urgence a été présentée pour l'hôpital de Cracovie (Pologne). Ce modèle a été mis en œuvre en utilisant le logiciel de simulation 3D « Flexsim Healthcare », afin de trouver des réponses aux questions suivantes : "Combien de temps l'évacuation prendra-t-elle, selon les différents horaires de la journée (appelés scénarios) ? et quel genre d'améliorations de faibles couts peuvent être réalisé pour réduire le temps d'évacuation ? ". Dans (Johnson, 2006), les auteurs ont décrit le développement de "Glasgow-Hôpital Evacuation Simulator" (G-HES) qui est un système stochastique interactif qui peut être utilisé pour simuler l'évacuation de grands bâtiments publics. L'évacuation générale d'un hôpital local a été utilisée comme un cas d'étude. Ce choix a été justifié par la difficulté d'effectuer de telles évacuations et par le nombre relativement élevé d'incendies qui surviennent dans les bâtiments de l'hôpital chaque année.

D'autres chercheurs ont utilisé la modélisation et la simulation basées agents pour améliorer le processus d'évacuation. Dans (Smith & Brokaw, 2008), les auteurs ont utilisé la modélisation basée agents pour l'évacuation d'un hôpital. Cette technique permet de modéliser et d'aider à planifier les évacuations d'urgence, d'exécuter de nombreux scénarios d'évacuation événementiels précis et de modéliser le mouvement des intervenants et du personnel de sécurité. Enfin, une modélisation à base d'agents pour la prise de décision socio-affectif et la simulation des comportements d'évacuation sociales et humains lors de situations d'urgence ont été présentées dans plusieurs travaux (Bosse, et al., 2013; Pan, Han, Dauber, & Law, 2007; Jiang, Zhang, Shang, & Tian, 2014).

Ainsi, un grand nombre de travaux de recherche ont porté sur l'évacuation des hôpitaux causée par une catastrophe naturelle comme les ouragans, les inondations, les tremblements de terre et les incendies internes. Cependant, seulement quelques chercheurs se sont focalisés sur l'évacuation de l'hôpital en raison d'une panne d'électricité. En effet, à ce jour, l'impact de la panne d'électricité sur les infrastructures de santé et les problèmes d'évacuation qui en résulte demeurent un domaine peu étudié et peu documenté. Il s'agit, au fait, de comprendre comment les hôpitaux sont affectés par une panne du réseau électrique, en particulier dans le cadre des événements extrêmes, et de préparer en l'occurrence la planification future de sorte que les effets peuvent être évités ou atténués (Klinger & Owen Landeg, 2014).

Néanmoins, la plupart des établissements ne possèdent pas des installations électriques de secours suffisantes pour assurer la continuité du fonctionnement de tous les services ou du moins des services critiques sur une long période de temps. Par exemple, lors de la panne d'électricité du Nord-Est en 2003, malgré le fait que 58 hôpitaux de New York avaient des générateurs de secours en place, la moitié des hôpitaux de la ville ont subi des échecs dans leurs générateurs d'alimentation de secours. Cet échec n'a pas été causé par l'absence des générateurs mais plutôt par des générateurs de capacité insuffisante ou par manque de compétences concernant la façon de faire fonctionner les générateurs en cas d'urgence réelle (Diesel service and supply, 2013).

Par conséquent, les hôpitaux et les centres médicaux doivent toujours être bien préparés à l'éventualité d'évacuer les patients lorsque la panne électrique persiste, et leurs systèmes électriques de secours ne fonctionnent pas.

### III.3 Cas réels de pannes électriques dans les hôpitaux

Dans le tableau (III.1), sont présentés des exemples de pannes électriques réelles survenues dans différents hôpitaux et résultant de diverses causes. A partir de ces cas réels et beaucoup d'autres sur internet, on peut conclure qu'une défaillance électrique dans un hôpital a deux principales sources distinctes et qu'elle peut être planifiée ou non planifiée :

- **Source interne** : tels qu'un incendie dans d'un câble central, une haute masse électrique, un achèvement d'un travail d'expansion ou un renforcement dans le secteur électrique nécessitant la coupure de l'électricité. Ça peut également être une fuite de gaz ou d'eau

intérieure ou tout type d'accident ou de dommages qui peut se compliquer davantage par la présence de l'électricité.

**Tableau III.1.** Cas réels de pannes électriques dans les hôpitaux

Date	Lieu de l'hôpital	Cause de la panne électrique	Type de la panne	Conséquences
5 mars 2013	Hôpital de Créteil (Paris) France	Un incident sur un réseau de transmission électrique a causé une perte de puissance à 58.000 abonnés parmi eux l'hôpital de Créteil (Metronews press, 2013).	Panne imprévue	19 adultes et 15 enfants hospitalisés dans l'hôpital Créteil ont dû être transférés à d'autres établissements médicaux parisiens.
8 septembre 2014	Hôpital de Alma (Quebec) Canada	Des travaux d'agrandissement au service d'urgence et ambulatoires (Radio-Canada press, 2014).	Panne prévue	Les patients nécessitant des équipements spécialisés ont été transférés aux services qui sont alimentés en électricité (de chirurgie et de soins intensifs), et vers d'autres hôpitaux régionaux.
18 septembre 2013	Hôpital de Antony France	Des coupures et des pannes de courant pendant des travaux, ce qui ont abouti à la combustion des cellules nourricières dans le réseau électrique de l'hôpital (LeParisien press, 2013).	Panne imprévue	Evacuation de 90 patients dans le service de réanimation sous soins intensifs et continue et des patients au cours de dialyse. Leurs infirmières attachées ont été aussi transférés.
30 octobre 2012	Hôpital de Tisch New York	Défaillance de groupes électrogènes au passage de l'ouragan Sandy (L'OBS Monde press, 2012).	Panne imprévue	Plus de 200 patients de l'hôpital Tisch dont 20 bébés dans l'unité néonatale ont été évacués vers d'autres hôpitaux de la ville.
17 Mars 2014	Centre médical de Bordj Bou Arreridj Algérie	Un court-circuit a provoqué un incendie. Il a détruit le poste de transformation électrique situé dans le bloc administratif du service de pédiatrie (ElMoujahid press, 2014).	Panne imprévue	La fumée qui se dégageait du bloc indisposait 60 résidents du service. Trente d'entre eux sont des enfants âgés de 5 mois et 11 ans. Trente autres sont leurs gardes patients. Ils ont été transportés à l'hôpital Lakhdar Bouzidi Bordj Bou Arreridj où ils ont été pris en charge.

- **Source externe** : tel qu'une catastrophe naturelle (une inondation, un ouragan, ...), un dommage ou un accident dans un immeuble près de l'hôpital en raison de travaux ou d'un autre événement. Cette source peut provoquer une défaillance dans les composants électriques associés à l'hôpital (poteaux électriques, câbles...).
- **Pannes prévues** : ce sont des interruptions planifiées d'avance soit pour effectuer la maintenance du système électrique, soit pour ravitailler de nouveaux services en électricité.
- **Pannes imprévues** : ce sont des interruptions causées par des événements imprévus tels que les tempêtes, des problèmes dans le système électrique ou d'autres événements extérieurs.

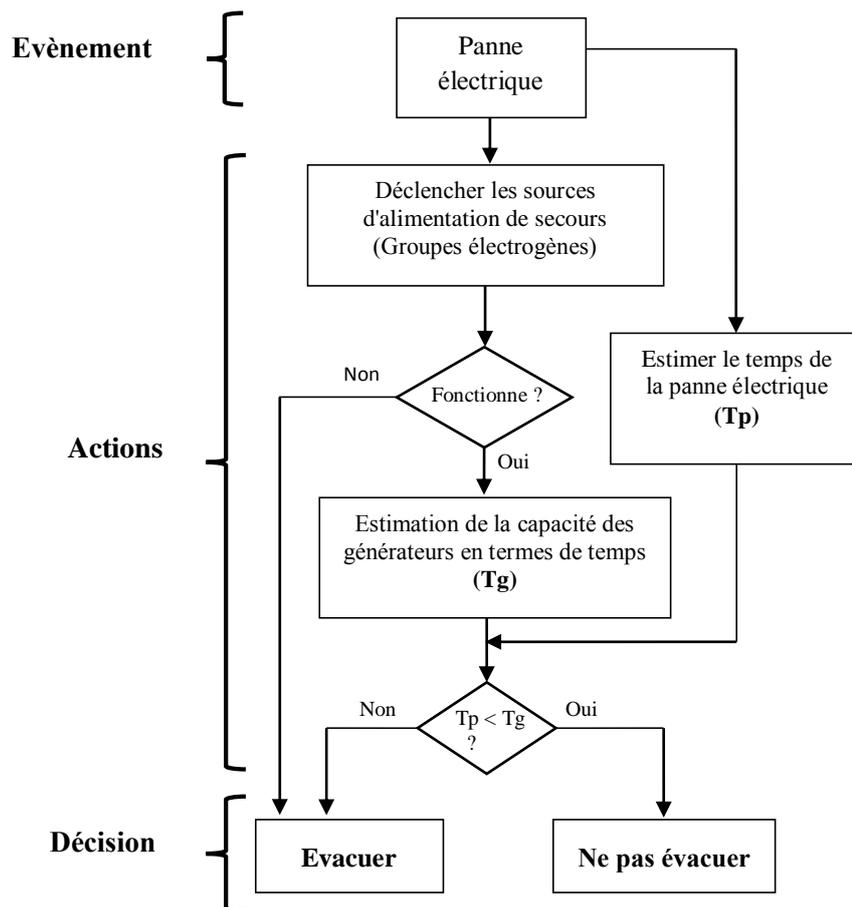
Il reste à noter, cependant, que la plupart des conséquences des différents événements cités dans le tableau (III.1) ont été des évacuations vers d'autres hôpitaux régionaux.

### III.4 Processus de la prise de décision d'évacuation

Selon l'association de protection contre les incendies (NFPA, 2006), le code de sécurité de la vie pour les établissements sanitaires considère l'évacuation complète comme le dernier recours des établissements de santé en raison de la nature des occupants. En principe, tous les hôpitaux doivent être renforcés avec le développement de la stratégie « se défendre sur place » pour éviter l'évacuation des patients. Cependant, après l'expérience de l'attaque terroriste du 11 septembre, les ouragans de Katrina et Rita, les feux de forêt de la Californie et d'autres événements (Kader, 2008), le concept de « l'hôpital en tant que victime » augmente de jour en jour et la question de l'évacuation des hôpitaux suscite un intérêt de plus en plus important.

Une décision d'évacuer un hôpital n'est pas facile à prendre ; lorsqu'une panne électrique survient, avant de décider d'évacuer ou de ne pas évacuer l'hôpital il faudrait d'abord bien diagnostiquer la défaillance électrique et évaluer s'il y a un réel besoin d'évacuer. Si oui, il faudrait alors déterminer clairement la façon appropriée de la prise de décision. Cette tâche qui requière une structure compétente de commande distincte, de contrôle et d'organisation est accomplie par les administrateurs en collaboration avec les techniciens et les ingénieurs du réseau électrique à travers un certain nombre d'actions qui sont illustrées dans la figure (III.1). Quel que soit les circonstances qui se présentent, la première règle à respecter d'une manière intransigeante, c'est que, si jamais quelque chose met en danger la sécurité des patients, la décision d'évacuation doit être prise immédiatement et sans aucune hésitation (Wabo, Ortenwall, & Khorram-Manesh, 2012). En fait, juste après la détection de la panne électrique,

toutes les sources d'alimentation de secours existantes sont automatiquement déclenchées pour assurer la continuité des soins et le fonctionnement des systèmes médicaux. Deux scénarios peuvent alors se présenter ; dans le premier, les batteries et les générateurs électriques de secours commencent à fonctionner normalement. Dans ce cas, il est nécessaire d'estimer la durée de la panne de courant  $D_p$  et la comparer à la période de fonctionnement des générateurs maximale  $D_g$ . Si  $D_p$  est supérieure à  $D_g$ , l'évacuation est décidée ; sinon, l'évacuation n'est pas décidée. Dans le second scénario, les sources d'alimentation de secours se trouvent hors service ou en panne (O'hara & Higgins, 1992); l'évacuation est immédiatement décidée.

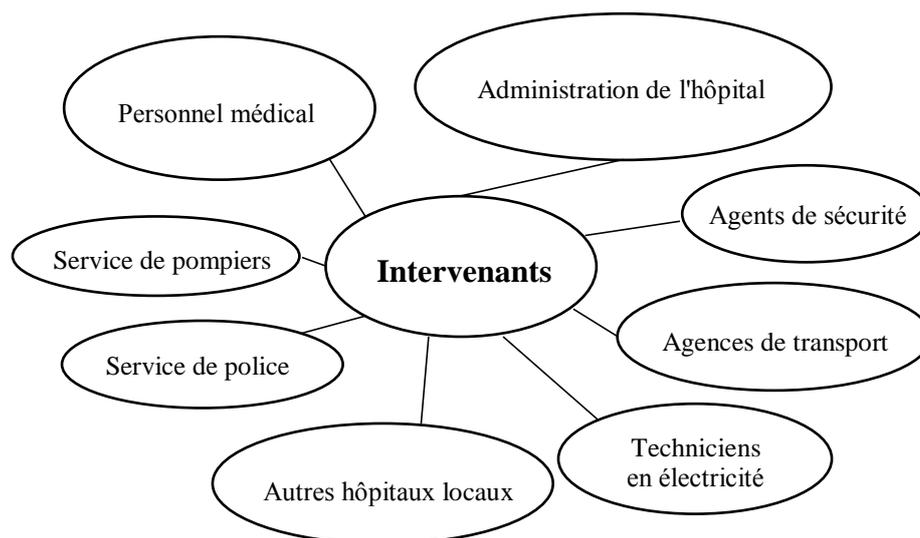


**Figure III.1.** *Processus de décision de l'évacuation*

Il existe deux types d'évacuations. Les administrateurs peuvent décider une évacuation partielle si la panne de courant est détectée dans un seul ou quelques services. Mais si la panne de courant est générale, ils doivent décider d'une évacuation complète.

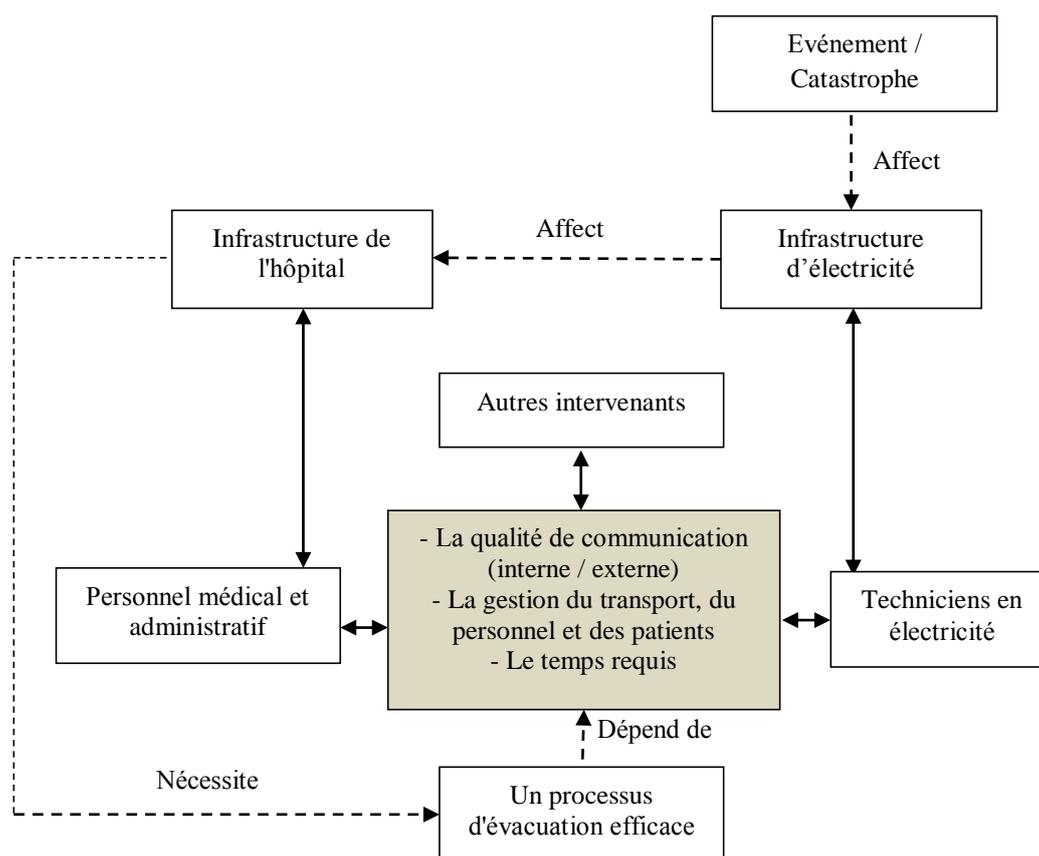
### III.5 Problèmes d'évacuation à la suite d'une panne électrique

Dès que la décision d'évacuation est prise, l'équipe à qui incombe la gestion des risques se confronte à plusieurs types de problèmes qui s'imposent et dont certains menacent la vie même des patients. Parmi les problèmes les plus immédiats on peut citer la contrainte des patients qui requièrent des soins intensif continus et qui sont donc incapables d'auto évacuation, la perturbation des activités du personnel, et la nécessité de réduire au maximum le temps d'évacuation des patients médicalement instables et dépendants d'équipements de soutien médical (Kader, 2008; Wabo, Ortenwall, & Khorram-Manesh, 2012). Les autres problèmes qui accompagnent le processus d'évacuation seront cités ultérieurement. L'évacuation est donc un processus complexe, qui nécessite des considérations particulières vis-à-vis de ces problèmes (Alazawi, Alani, Abdljabar, & Mehmoud, 2014). Par conséquent, les interventions d'urgence du processus d'évacuation doivent être soigneusement planifiées avec la collaboration de plusieurs intervenants, qui appartiennent aux différents organismes et services, tels que le personnel médical, l'administration de l'hôpital, la police, les services d'incendie, les agents de sécurité, etc., tel que spécifié dans la figure (III.2). Ces derniers ont tous le même objectif : « sauver la vie des patients ».



**Figure III.2.** Intervenants impliqués dans le processus d'évacuation

Dans la figure (III.3) est présentée la problématique de notre thème de recherche où sont recueillis tous les paramètres qui contribuent à la réussite du processus d'évacuation, y compris la qualité de la communication, l'efficacité de la coordination entre les différents intervenants et le contrôle du temps d'évacuation.



**Figure III.3.** Description de la problématique

Sur la base des rapports établis dans les références (Squillace, 2010; Aved, Ho, Hua, Hoang, & Hamza-Lup, 2006; Adalja, et al., 2014) et des entretiens que nous avons réalisés avec plusieurs intervenant potentiels concernés (responsables, médecins, pompiers, infirmiers, ambulanciers ...), on peut constater que la majorité des problèmes d'évacuation sont liés à la communication, la gestion du transport, du personnel et des patients. Pour tous ces paramètres, le facteur temps joue un rôle crucial et décisif dans la sauvegarde de la vie des patients en danger. Chaque fois que le processus d'évacuation accélère, le volume des risques est réduit et par conséquent, la probabilité de perdre des vies de patients est minimisée. Parmi les problèmes qui font obstacle au processus d'évacuation et qui ralentisse sa progression en cas de panne électrique, on peut citer :

### III.5.1 Problèmes avant l'évacuation

- La difficulté de diffuser rapidement les informations principales de la panne électrique survenue aux intervenants ce qui ralentit le démarrage du processus d'évacuation.

- La difficulté d'avoir les informations initiales pour commencer le processus d'évacuation. Parmi ces informations, le nombre des patients à évacuer, la liste des patients par un ordre de priorité, le type et le nombre de personnes qui sont nécessaires pour préparer et évacuer chaque type de patients, la nature des moyens de transport qui doivent être utilisés pour chaque type de patient, l'hôpital et le service médical spécifique où chaque patient doit être transporté.
- L'incapacité à communiquer avec certains intervenants en raison de l'absence de mise à jour des listes d'appels d'urgence.
- La difficulté d'échanger correctement des informations entre les différentes parties prenantes à l'aide du téléphone fixe à cause de l'encombrement des lignes et du vacarme qui se prescrivent fréquemment dans de telles situations.
- Plusieurs personnes clés dans le processus d'évacuation peuvent ne pas recevoir la notification officielle des instructions juste après l'événement de catastrophe en raison de la panique et le désordre.
- Le temps considérable que les instructions de l'administration puissent prendre pour atteindre toutes les parties prenantes.

### **III.5.2 Problèmes durant l'évacuation**

- Sans l'aide des ordinateurs, qui sont complètement neutralisés, les emplacements des patients au sein de l'hôpital et leurs renseignements personnels et médicaux deviennent difficiles à consulter et à connaître.
- La difficulté d'accorder des priorités aux patients pour les transférer vers d'autres hôpitaux.
- L'absence d'un plan d'actions rapide et efficace à la portée des parties prenantes.
- Le manque de communication lors de l'évacuation entre les différentes parties prenantes.
- L'ignorance par les administrateurs de l'hôpital de l'état d'avancement du processus d'évacuation, du temps d'évacuation consommé par chaque patient et du nombre de patients évacués à chaque instant, et celui de ceux qui sont encore en attente d'évacuation.

### **III.5.3 Problèmes après l'évacuation**

- Le manque des informations qui permettent d'évaluer et d'estimer le temps et le coût du processus d'évacuation.

## III.6 Système d'aide à la gestion des interventions d'urgence (SAGIU)

### III.6.1 Description du SAGIU

L'objectif principal de ce travail consiste à résoudre ou, du moins, réduire considérablement la majorité des problèmes précédemment cités. Il s'agit donc, principalement, d'améliorer au maximum la qualité de communication (interne / externe) entre les différents intervenants et de réduire le temps requis pour la mise en pratique des différentes étapes du processus d'évacuation. A cet effet, nous avons proposé un système d'aide à la gestion des interventions d'urgence (SAGIU) du processus d'évacuation dont la description et la modélisation sont présentés dans ce qui suit.

Le SAGIU du processus d'évacuation se compose d'une série de sous processus à exécuter, allant du sous processus de déclenchement de l'alarme, suite à la survenue de la panne, jusqu'à celui assurant le transport des patients. Chaque sous processus a sa propre mission à accomplir grâce à la réalisation d'un ensemble d'activités et la prise de certaines décisions selon une chronologie bien déterminée. La description de ces sous processus est présentée en détail dans la section suivante.

Cependant il est important de signaler que le SAGIU proposé doit disposer de toutes les données requises pour l'exécution des actions de ces différents sous processus ce qui implique que ces données doivent être disponibles au niveau de l'administration de l'hôpital au moment de la panne électrique. Elles concernent essentiellement toutes les informations sur l'infrastructure de l'hôpital à évacuer, les patients et leur position dans l'hôpital, les intervenants impliqués dans le processus d'évacuation, les ressources matériels, les moyens de transport et les hôpitaux susceptibles de recevoir les patients.

Les données décrite ci-dessus sont définit par :

- Un ensemble de patients à évacuer à un instant  $t$  est noté par :  $N$
- L'  $i^{\text{ème}}$  action d'évacuation du patient  $p$  est notée par :  $A_{i,p}$
- L'évacuation du patient  $p$  tel que  $p \in [1, \dots, N]$  nécessite un nombre  $n_p$  d'actions d'évacuation ordonnées,  $i \in \{1, \dots, n_p\}$
- Chaque action d'évacuation  $A_{i,p}$  pour évacuer le patient  $p$  peut être réalisée par un ensemble d'intervenants définit dans le tableau (III.2):

**Tableau III.2.** *Intervenants du processus d'évacuation*

Médecin	$I_1$
Réanimateur/ Anesthésiste	$I_2$
Infermière	$I_3$
Pompier	$I_4$
Ambulancier	$I_5$

- L'ensemble intégrale des intervenants est noté par :  $M$
- L'affectation d'une action d'évacuation  $A_{i,p}$  à un intervenant  $I_m$ ,  $m \in [1, \dots, M]$  entraîne l'occupation de cet intervenant pendant une durée.
- Chaque action d'évacuation  $A_{i,p}$  pour un patient  $p$  utilise un ensemble de ressources matérielles de transport :
- L'ensemble intégrale des ressources matérielles est noté par :  $R$
- L'affectation d'une action d'évacuation  $A_{i,p}$  à une ressource  $R_k$ ,  $k \in [1, \dots, R]$  entraîne l'occupation de cette ressource pendant une durée.

### III.6.2 Sous processus du SAGIU

Comme une étape cruciale, le système va déclencher une alerte juste après la décision d'évacuation est prise. Dans la deuxième étape, le système va préparer la liste des patients concernés par l'évacuation et ça dans un temps très court. Ensuite, l'ordre des priorités des patients doit être défini par le système et respecté par les intervenants.

Dans la troisième étape, les ressources et le personnel nécessaires doivent être définis et disponibles pour préparer le patient à être transporté. Enfin, les patients sont déplacés vers des hôpitaux choisis en utilisant le moyen de transport et la destination définis par le système.

Ces étapes présentent les sous processus du SAGIU proposé qui sont déjà prédéfinies et prêtes à être exécutées que ce soit en cas de test par simulation d'une panne électrique ou en cas d'occurrence d'une panne réelle. Ces derniers sont donnés schématiquement sur la figure (III.4).

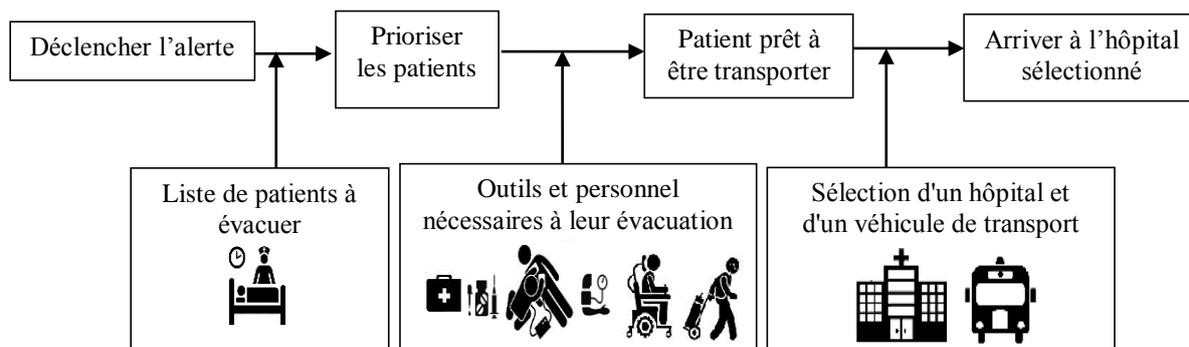


Figure III.4. Sous processus du SAGIU

### III.6.2.a Sous processus de déclenchement de l'alerte (SP1)

Une fois la décision d'évacuation est faite, ce sous processus déclenche une alerte qui est instantanément communiquée sous forme d'un message, destiné aux parties prenantes impliqués, pour les informer de la survenue de la panne et sur la nécessité de leurs immédiates interventions. L'ensemble des informations du message d'alerte est fourni au SAGIU par le personnel du service administratif de l'hôpital après avoir défini le type de la panne ainsi que l'ensemble des services touchés en cas de panne partielle comme montrer dans la figure (III.5).

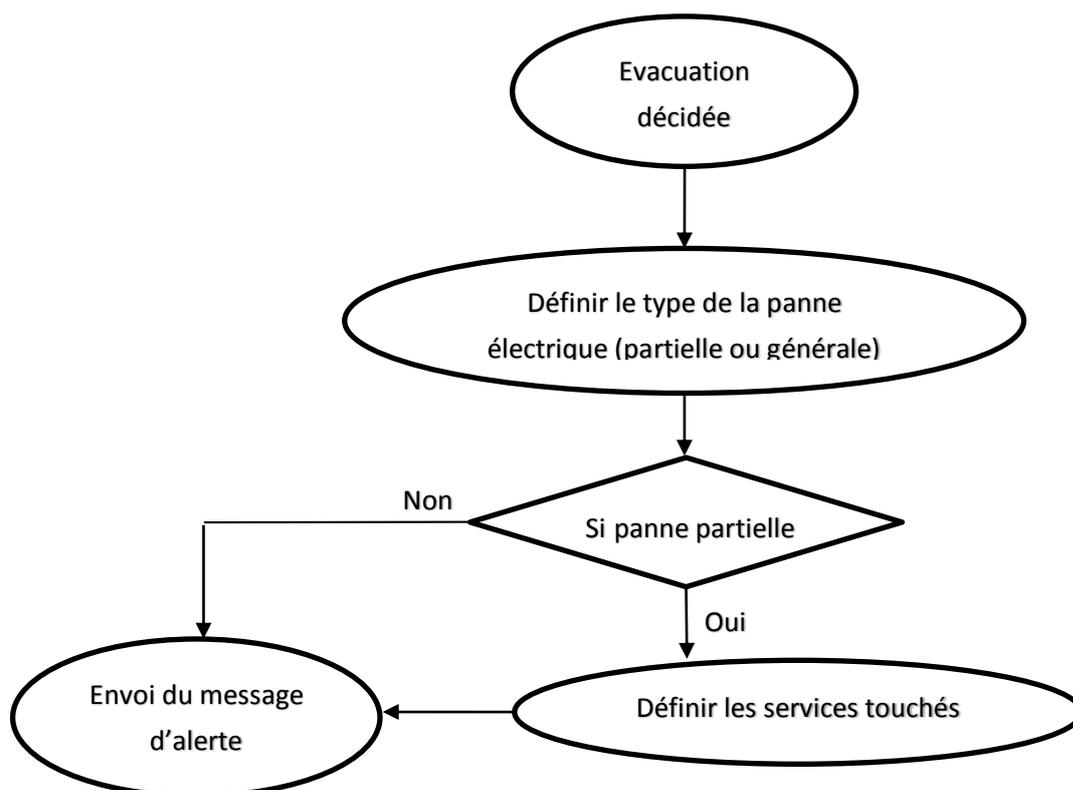


Figure III.5. Sous processus de déclenchement de l'alerte

### III.6.2.b Sous processus d'identification des patients à évacuer (SP2)

Une fois l'alerte est déclenchée, ce sous-processus prépare la liste des patients à évacuer selon le type de la panne électrique survenue et le mode d'évacuation décidé comme illustré dans la figure (III.6). Cette liste inclue le nom, l'état et la localisation de chaque patient.

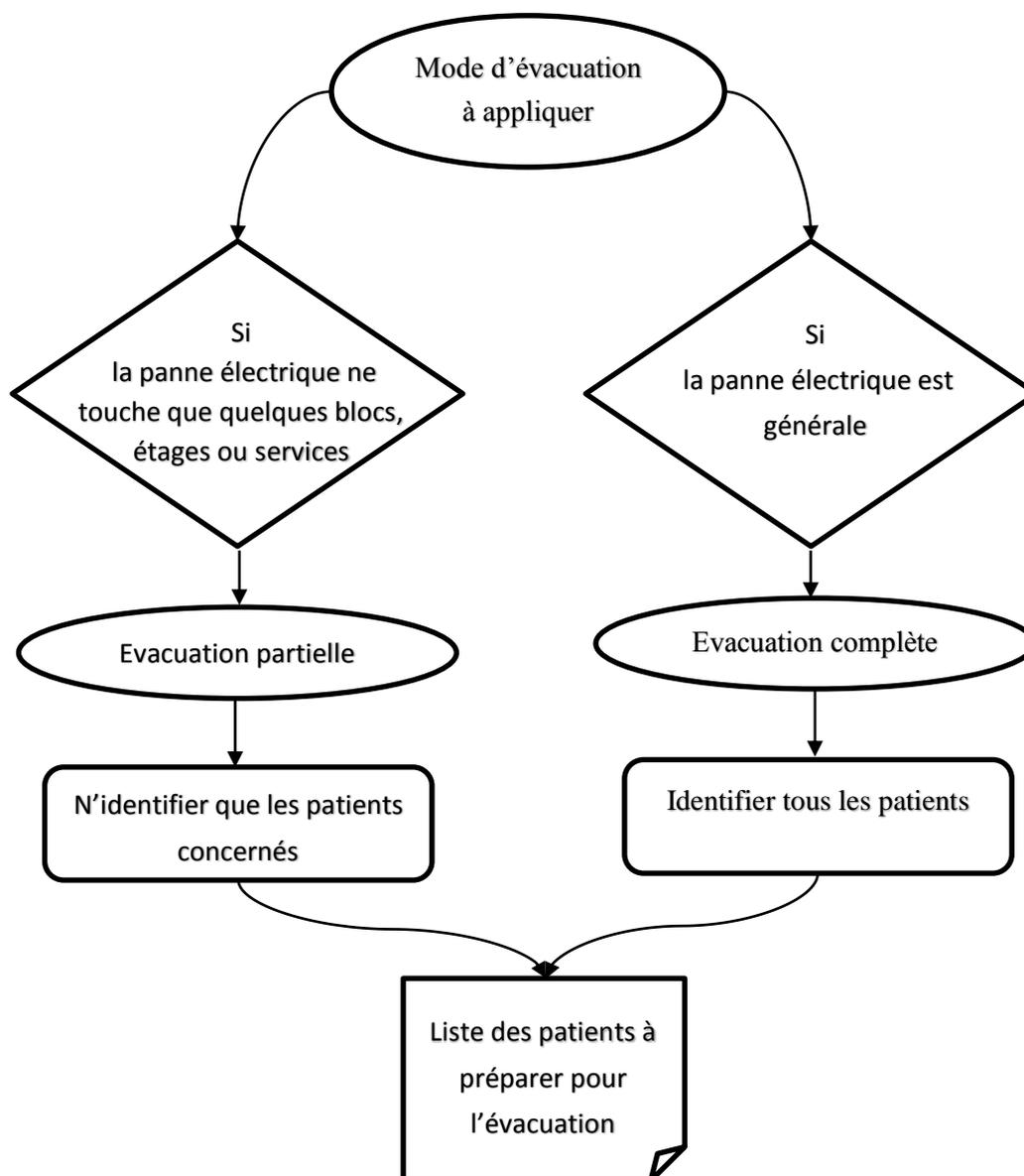


Figure III.6. Sous processus d'identification des patients à évacuer

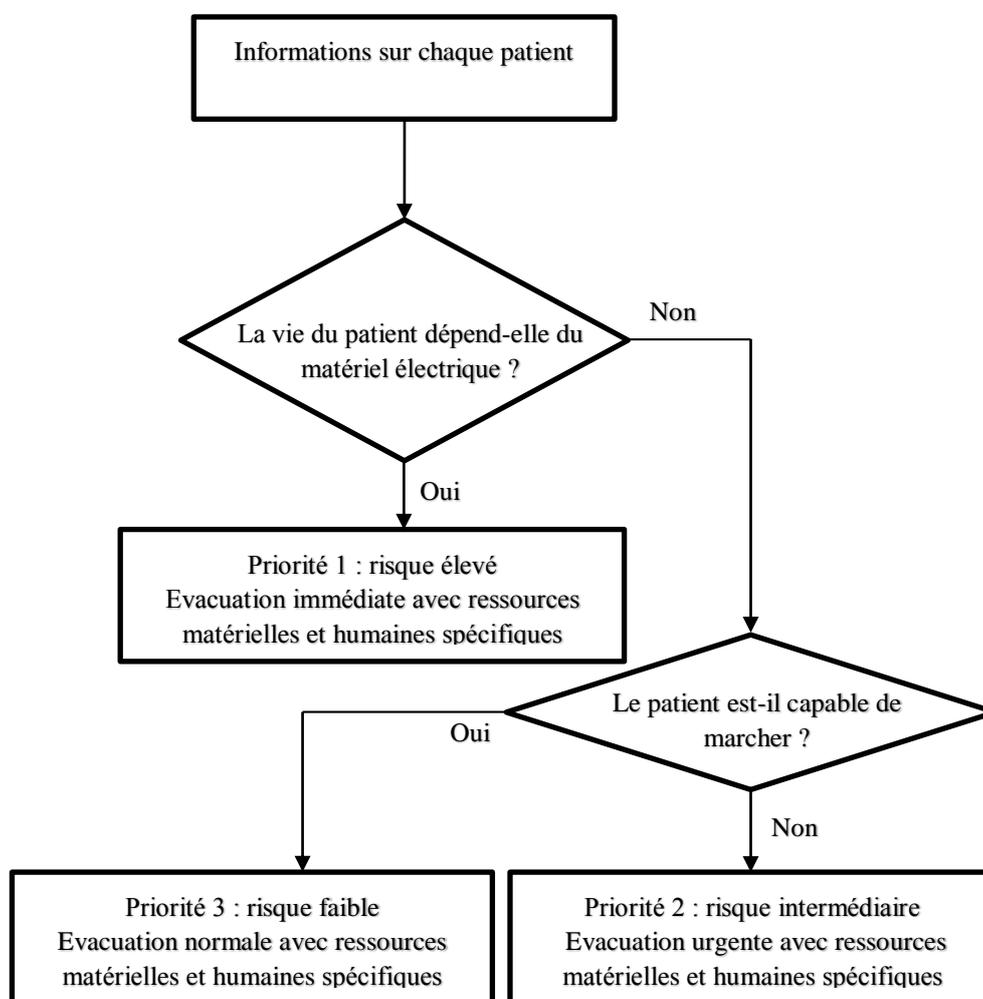
### III.6.2.c Sous processus de priorisation des patients (SP3)

Sachant que les moyens à bord, quel que soit leur importance, ne pourraient aucunement prendre en charge l'évacuation de tous les patients concernés en même temps, et étant donné

que la gravité de l'état de santé varie d'un malade à un autre, il est impératif lors de l'évacuation d'appliquer un critère de priorisation soigneusement établie.

L'ordre de priorité adopté par le système proposé durant le processus d'évacuation, tel qu'illustré dans la figure (III.7), est organisé comme suit :

- Première priorité pour les risques élevés (patients dont la survie dépend du matériel électrique : dialyse, réanimation, couveuse...).
- Deuxième priorité pour les risques intermédiaires (patients qui ne sont pas physiquement capables de marcher : dans l'attente de faire des radios, des analyses ou une intervention chirurgicale...)
- Troisième priorité pour les patients à faible risque (fracture des membres supérieur, femme en ceinte...).



**Figure III.7.** Sous processus de priorisation des patients

Les patients peuvent ainsi être classés en deux catégories, celle des patients non autonomes, qui doivent être transportés par une ambulance et avec l'aide de personnel qualifié (patients des priorités 1 et 2), et celle des patients autonomes qui peuvent être évacués avec les transports publics (priorité 3) donc peu de ressources matérielles ou humaines spécifique pour les assister.

#### III.6.2.d Sous processus de préparation des patients (SP4)

Les intervenants impliqués dans ce sous processus reçoivent dans un premier temps, à partir du SAGIU, toutes les informations concernant le nombre et le type de ressources matérielles et humaines nécessaires et convenable pour que le patient soit prêt à être transporter ; ce qui leur permettrait, par la suite, de préparer le patient efficacement et dans un temps réduit, au sous processus de transport prochain. L'objectif du sous processus de préparation des patients consiste donc à définir les ressources nécessaires en nombre et en type à la bonne personne et au bon moment comme définit dans la figure (III.8). En conséquence, cette étape extrêmement importante du SAGIU, assure l'optimisation de ressources utilisées.

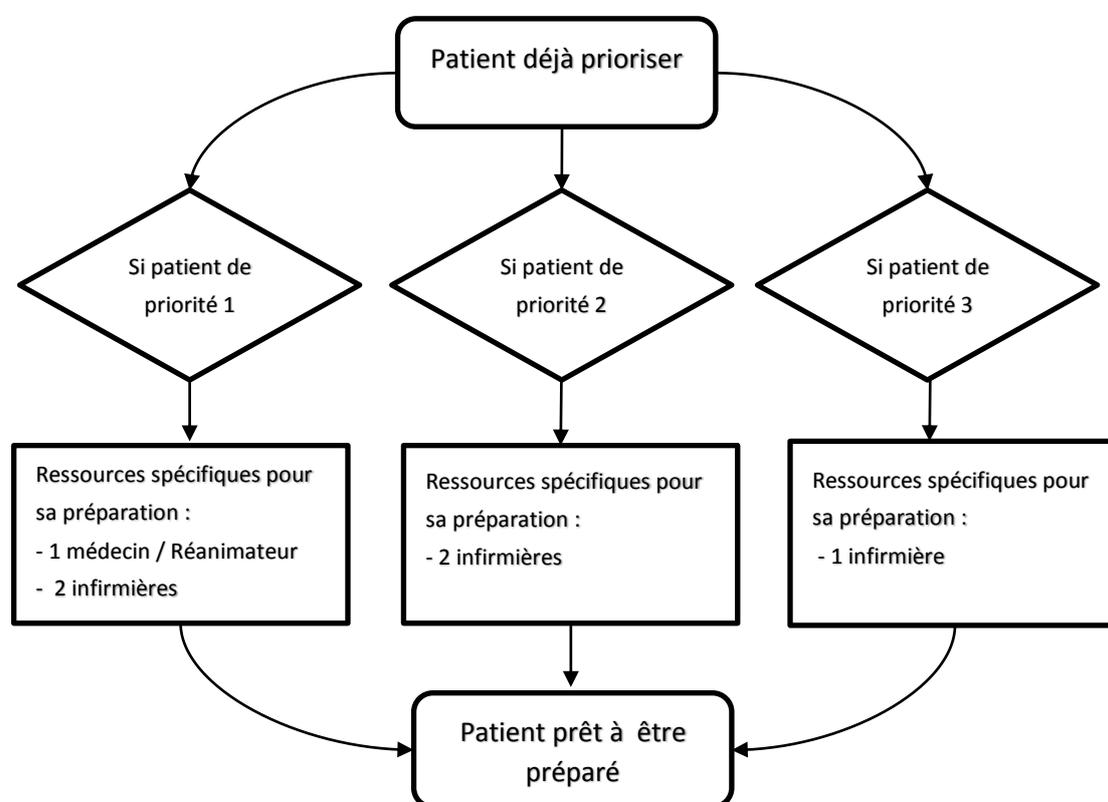


Figure III.8. Sous processus de préparation des patients

### III.6.2.e Sous processus de transport des patients (SP5)

Les patients hospitalisés et affecté par la panne vont être transportés vers d'autres hôpitaux. Dans ce cas, notre système sélectionne l'hôpital convenable pour chaque type de patients en considérant la disponibilité des services adéquats comme critère de choix. Par exemple, les patients qui ont été dans le service de pédiatrie vont être évacués vers un hôpital (public ou privé) ayant ce même service.

En distingue deux étapes pour transporter les patients. Pour ces deux étapes, le système va définir pour chaque patient, selon son type de priorité, les moyens humains et matériels nécessaires.

- La première étape consiste à déplacer le patient déjà préparé de sa chambre vers le rez-de-chaussée. Dans le cas normal (disponibilité de l'électricité) le personnel médical utilise les ascenseurs ce qui facilite cette tâche mais en cas de panne électrique, ils seront obligé d'utiliser les escaliers, des moyens de transport spéciaux, aussi ils seront besoin de l'aide et l'intervention les agents de sécurité comme définit dans la figure (III.9).

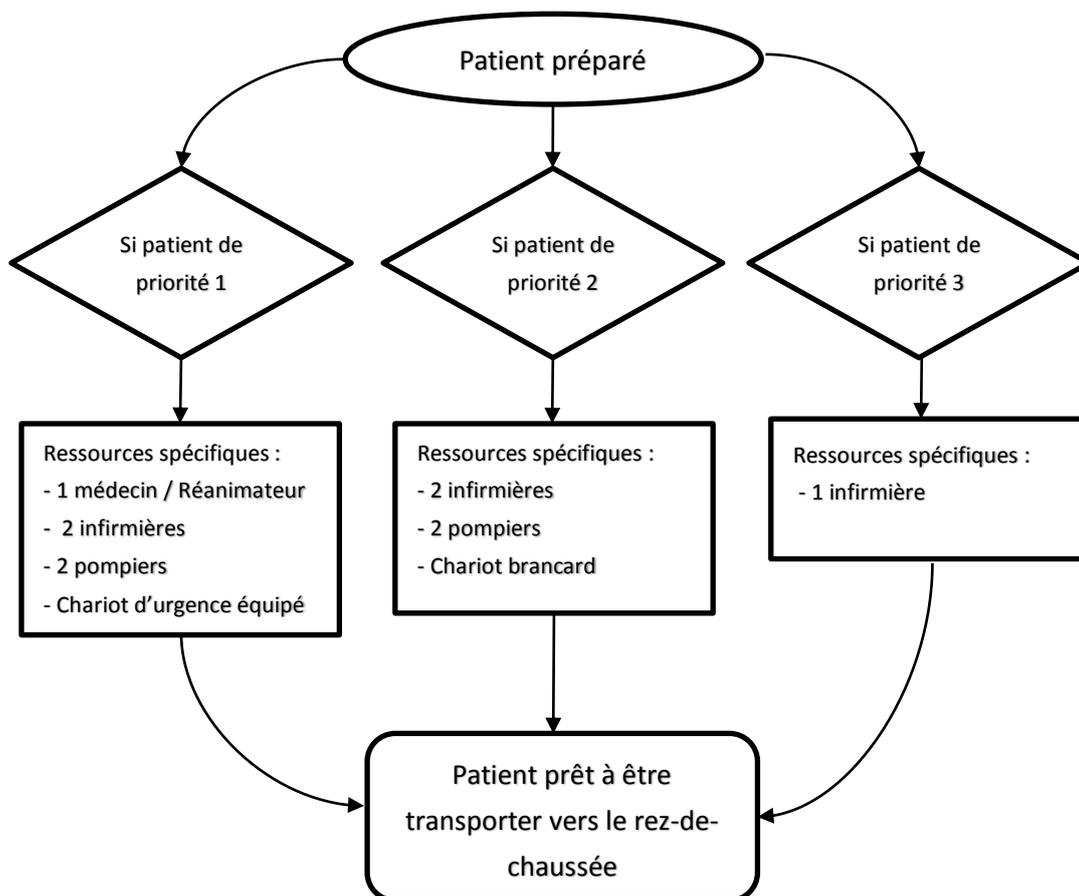
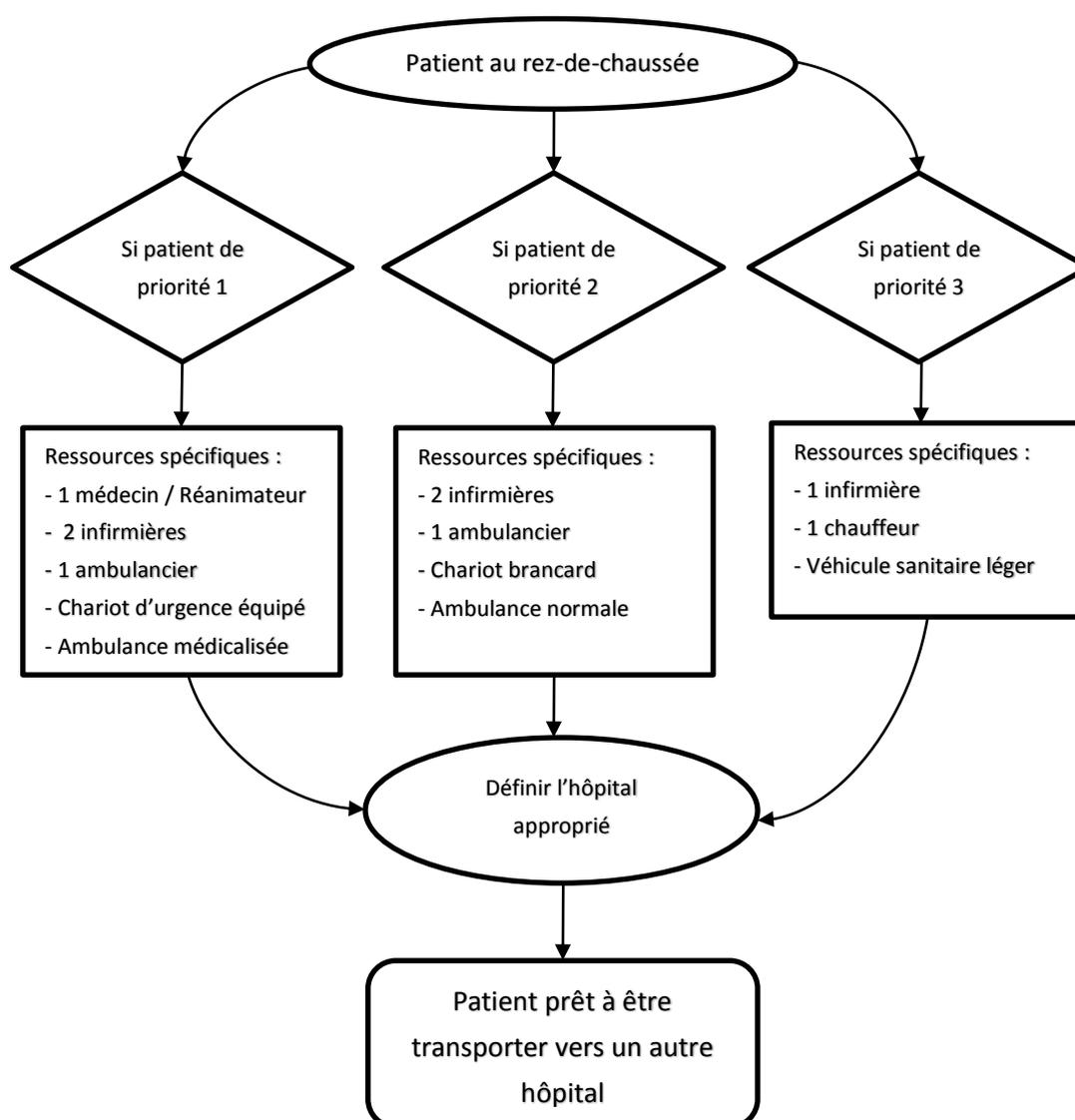


Figure III.9. Sous processus de transport des patients (1<sup>ère</sup> étape)

- La deuxième étape consiste à transporter le patient du rez-de-chaussée vers un autre hôpital (public ou privé) en utilisant un ensemble de ressources spécifiques pour chaque type de patients comme définit dans la figure (III.10). Pour ce faire les hôpitaux sont alimentés par différents catégories de véhicules :
- Ambulance médicalisée : conçue et équipée pour le transport, les soins intensifs et la surveillance des patients de la priorité 1. Elle peut transporter à la fois 1 seul patient au maximum en position allongée. L'équipage de cette ambulance est composé d'un ambulancier, de deux infirmiers et d'un médecin ayant des compétences en anesthésie / réanimation.



**Figure III.10.** Sous processus de transport des patients (2<sup>ème</sup> étape)

- Ambulance normale : conçue et équipée pour le transport sanitaire de patients dont l'état de santé ne laisse pas présager qu'ils puissent devenir des patients en détresse (Patients de priorité 2). Cette ambulance transport à la fois 1 seul patient au maximum en position allongée. L'équipage de cette ambulance est composé d'un ambulancier et d'un infirmier.
- Véhicule sanitaire léger : dédié pour le transport des patients de la priorité 3. Ce type de véhicule peut transporter 3 patients au maximum en position assise. L'équipage de ce véhicule est composé d'un simple chauffeur et d'un infirmier.

### III.6.3 Agents intervenants du SAGIU

Afin d'exécuter les différents sous processus du SAGIU, plusieurs types d'intervenants sont nécessaires, tel que chacun d'entre eux a un ou plusieurs sous processus à exécuter. Dans ce qui suit, la description de chaque groupe d'intervenants est présentée avec un diagramme d'UML de cas d'utilisation (Figure (III.11)) qui englobe la totalité des actions et des agents impliqués dans le système proposé.

#### III.6.3.a Agents intervenants avant la panne

- **Agent de gestion des patients (AGP):** responsable de saisir les différentes données sur les patients qui sont nécessaires pendant le processus d'évacuation. Ces données sont extraites de la base de données de gestion de l'hôpital. L'intervenant en charge de cette tâche est habituellement un membre de l'administration de l'hôpital tel que les agents de saisie et les infirmières d'accueil. Pour ajouter chaque patient, l'agent enregistre son nom complet, le service et la salle où il se trouve, sa catégorie, son mode de transport et l'équipement dont il a besoin. Ces données qui doivent être mises à jour continuellement 24h / 7d sont nécessaires pour fournir au système tous les paramètres dont il a besoin pour créer le processus d'évacuation et exécuter les actions s'y afférant avec rapidité.

#### III.6.3.b Agents intervenants pour décider et lancer le processus d'évacuation

- **Agents de gestion de l'hôpital (AGH) :** ce sont les responsables et les gestionnaires de l'hôpital tel que le directeur. Ces agents prennent les décisions dans les situations d'urgence telle que la décision d'exécution du processus d'évacuation. Cette décision est principalement basée sur les informations reçues des techniciens de l'électricité. En conséquence, le système proposé créera le scénario adapté à la situation générée et enverra

toutes les instructions appropriées à appliquer par les différents agents concernés par le processus d'évacuation.

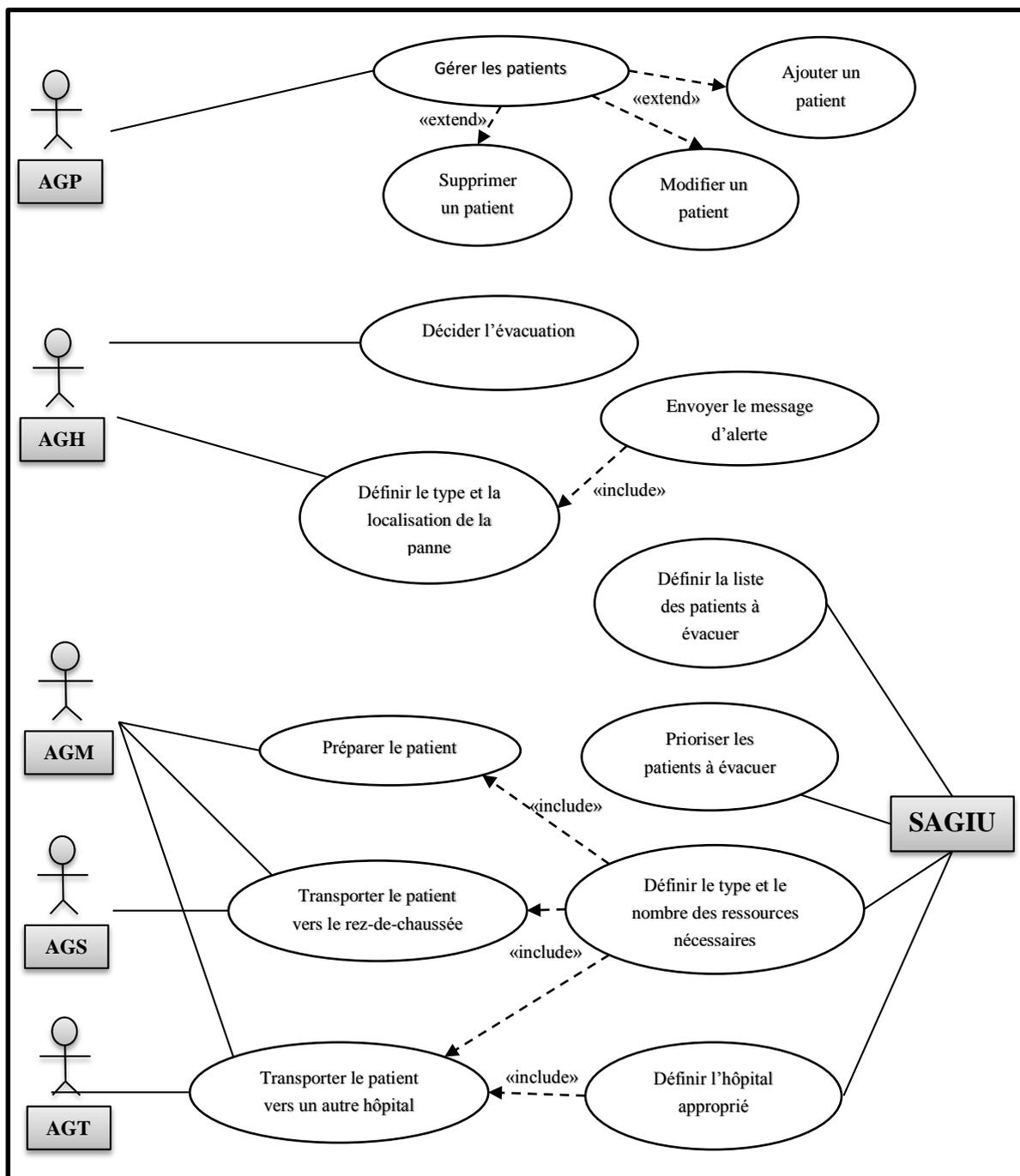


Figure III.11. Diagramme de cas d'utilisation général

### III.6.3.c Agents intervenants pour appliquer le processus d'évacuation

- **Agents de gestion médicale (AGM) :** ce sont les membres du personnel médical de l'hôpital (médecins et infirmières) chargés d'établir le statut d'évacuation de chaque patient.

Selon les instructions reçues, le AGM doit évacuer les patients dans l'ordre prioritaire défini par le système et donne les premières aides médicales, en particulier à ceux qui ont besoin d'équipement électrique pour survivre, avant et pendant l'évacuation. Par exemple, les patients sur les ventilateurs en l'absence d'électricité doivent être ensachés à l'aide d'un ambu-bag pendant l'évacuation.

- **Agent de gestion de la sécurité et de la protection (AGS) :** ce sont les agents de sécurité de l'hôpital, les pompiers, ...etc. Ils sont responsables d'aider les AGM dans le processus d'évacuation des patients en fournissant de la main-d'œuvre et d'autres ressources pour une évacuation sûre et rapide. En fait, les ascenseurs ne sont pas accessibles en cas de panne électrique ; les AGS sont obligés de transporter les patients d'un étage à l'autre à l'aide d'escaliers.
- **Agent de gestion des transports (AGT) :** ce sont les ambulanciers et les chauffeurs responsables de l'exécution des instructions du système concernant la gestion du transport des patients vers les autres hôpitaux en fonction du type de patients et de la disponibilité des services dans les hôpitaux régionaux.

### III.6.4 Modélisation et simulation prescriptive du SAGIU

Parmi l'ensemble des modèles existant dans la littérature nous avons choisi le modèle de la simulation prescriptive tel que décrit dans le premier chapitre. Ce modèle est, en effet le plus adapté au SAGIU du fait que, la simulation, dans notre cas, est utilisée pour prescrire une solution d'optimisation dans l'analyse du système proposé, la conception et les processus de contrôle (Rossetti, 2015). Par ailleurs, le modèle prescriptif répond à chaque étape de simulation à la question : **Que devons-nous faire ?**

#### III.6.4.1 Scénarios prescriptifs

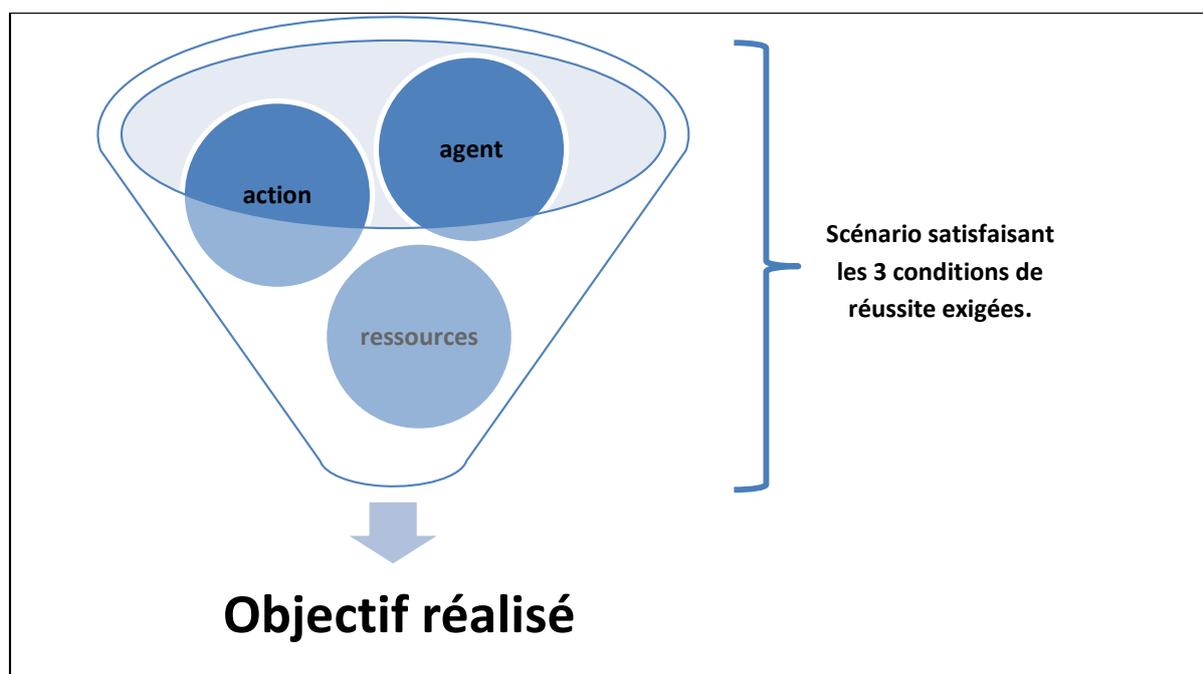
Afin de modéliser le déroulement des actions dans chaque sous processus de notre système, nous avons utilisé un modèle basé-scénarios prescriptifs.

La création des scénarios prescriptifs constituant le modèle du SAGIU proposé est considérée comme étant le fil directeur pour simuler les différents types d'actions entreprises dans chaque sous processus du SAGIU. Une fois établis, ces scénarios vont décrire, d'une part, le déroulement prévu des actions tout en précisant les intervenants, le rôle et les activités à entreprendre par chacun, ainsi que l'environnement et les ressources matérielles nécessaires.

D'autre part, ils permettent de prescrire l'enchaînement des activités pour assurer une meilleure efficacité des actions et une meilleure organisation.

Afin que l'objectif du processus d'évacuation du SAGIU proposé soit accompli avec réussite, il faut que, pour chaque scénario, les trois points suivants soient acquis (figure (III.12)) :

- L'action proposée définie avec précision,
- Le nombre et le type des intervenants bien déterminé,
- Les ressources nécessaires bien spécifiées.



**Figure III.12.** Scénario d'action réussie

A cet effet, dans notre simulation on supposera que ces exigences sont satisfaites. Il faut noter, cependant qu'en cas réel, la faisabilité d'un scénario exige la disponibilité effective des agents et des ressources.

La réalisation d'un scénario d'action est accomplie en trois phases successives avec la possibilité d'observer le déroulement de chacune d'elles. Comme illustré sur la figure (III.13), la première phase correspond à l'état « attente d'exécution » et qui s'achève dès le début de la deuxième phase correspondant à l'état « en cours d'exécution ». Une fois l'exécution de l'action est terminée, la troisième phase correspondant à l'état « terminée » est entamée.

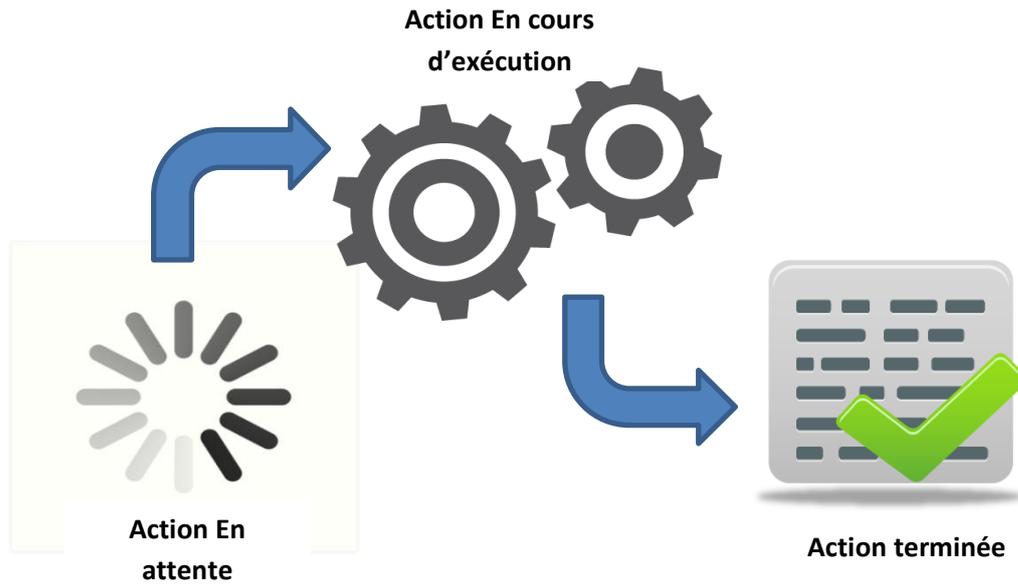


Figure III.13. Phases de déroulement d'une action

La figure (III.14) présente la schématisation du modèle prescriptif du SAGIU proposé pour le processus d'évacuation d'un patient. Celle-ci retrace toutes les étapes du modèle selon l'enchaînement établi antérieurement. Pour plusieurs patients on retrouve :



Figure III.14. Modèle prescriptif du SAGIU pour un patient

- 1- La situation initiale : survenue de la panne + évacuation décidée ;
- 2- SP1 [un seul scénario (S1)] : informer, sensibiliser + intervenir dans l'immédiat ;
- 3- SP2 [un seul scénario (S2)] : fournir la liste des n patients à évacuer ;
- 4- SP3 [un seul scénario (S3)] : appliquer l'ordre de priorité ;
- 5- SP4 [n scénarios (S4i)  $i=1, \dots, n$ ] : renseignements sur les ressources humaines et matérielles nécessaires pour préparer chaque patient i ;
- 6- SP5 [n scénarios (S5i)  $i=1, \dots, n$ ] : renseignements sur le type de véhicule de transport, les intervenants et la destination pour chaque patient i.

Nous avons vu que le modèle proposé s'intéresse au déroulement des scénarios d'actions, de plus, il s'intéresse à leurs enchaînements et leurs ordres d'exécution au sein du processus d'évacuation. Comme montré dans la figure (III.14), les scénarios S1, S2 et S3 sont exécutés successivement l'un après l'autre alors que les deux derniers S4 et S5 sont exécutés successivement pour le même patient et peuvent être exécutés en parallèle pour des patients différents.

### III.7 Conclusion

Dans ce chapitre, a été présenté une description et une modélisation des différents sous processus et intervenants impliqués dans le SAGIU proposé. Pour modéliser les différentes étapes du processus d'évacuation, une modélisation basée sur la création de scénarios prescriptifs de simulation a été proposé. En regardant le modèle, nous pouvons facilement obtenir une bonne idée sur la séquence des événements et des activités à effectuer. Dans le chapitre suivant, nous allons présenter la démarche suivie pour développer une application web-mobile implémentant de tel système.

## **Chapitre IV**

---

### **Système d'Aide à la Gestion des Interventions d'Urgence (SAGIU) : Application & Résultats**

---

**SOMMAIRE**

---

IV.1 Introduction -----	76
IV.2 Objectifs de l'application-----	76
IV.3 Architecture de l'application-----	77
IV.3.1 Les agents-----	77
IV.3.2 La base de données-----	78
IV.3.3 Le serveur web-----	79
IV.4 Modèle de la base de données de l'application -----	79
IV.5 Implémentation de l'application -----	81
IV.6 Fonctions de l'application -----	83
IV.6.1 Authentification des utilisateurs -----	84
IV.6.2 Gestion des patients (Portail d'accueil)-----	85
IV.6.3 Déclenchement de l'alerte (Portail admin)-----	86
IV.6.4 Exécution des actions du processus d'évacuation (Portail général)-----	87
IV.6.4.a Scénario d'une action de préparation d'un patient -----	89
IV.6.4.b Scénario d'une action de transport d'un patient au rez-de-chaussée -----	90
IV.6.4.c Scénario d'une action de transport d'un patient vers un autre hôpital-----	90
IV.7 Test et validation -----	91
IV.8 Discussion et conclusion -----	93

---

## IV.1 Introduction

De nos jours, les établissements de santé sont contraints d'intégrer de plus en plus les progrès récents dans le domaine des télécommunications et de l'informatique et donc de profiter au maximum des avantages incommensurable des nouvelles technologies mobile (Tablet, PC, téléphone mobile, smartphone, etc.) et les réseaux sans fil, tel que le Wifi, 3G et 4G, etc. Ceci leur permettrait, par exemple, de jouir d'une diffusion accrue, rapide, efficace et de haute qualité de l'information et des communications entre les patients, les médecins et autre personnel. C'est justement ce défi qui nous a pousser, et sans aucune hésitation, à intégrer notre SAGIU au sein d'une application web-mobile.

La première partie de ce chapitre présente les différents objectifs à atteindre par l'application proposée. Puis, dans la deuxième partie, a été établie l'architecture de cette application. La troisième section décrit le modèle de la base de données de l'application. Ensuite, les outils d'implémentation de l'application ont été définit. Dans la cinquième partie, quelques fonctions principales de l'application ont été illustrées. La sixième partie décrit les phases de test et de validation de l'application et présente le cas d'étude choisis. Finalement, le chapitre est clôturé par une discussion et une conclusion.

## IV.2 Objectifs de l'application

Le SAGIU, tel que décrit et modélisé dans le chapitre précédant, offre, grâce à sa conception et au modèle prescriptif adopté, une solution d'évacuation de haut niveau organisationnel ; ce qui se traduit par une réduction très significative du temps d'évacuation. Cependant, une étude plus approfondie dans la référence (Chen, Guinet, & Ruiz, 2015) a pu nous convaincre qu'un système comme le nôtre à lui seul, malgré ces avantages, reste de loin insuffisant pour assurer une sécurisation acceptable des vies des patients. Une simple observation des différentes phases du processus d'évacuation utilisant le SAGIU a permis de constater qu'une proportion la plus importante du temps d'évacuation est consommée dans les deux points suivants :

- L'acquisition de données
- La diffusion de l'information

La solution qui a été adopté pour contourner cette limitation était donc de réaliser et implémenter le SAGIU au sein d'une application web basée principalement sur l'utilisation de dispositifs mobiles. Cette application est développée afin de profiter au maximum des

avantages offerts par les technologies récentes des réseaux informatiques et mobile, et par conséquent, de réaliser une stratégie extrêmement efficace en termes d'efficacité de communication en temps réel entre les différents acteurs et de coordonner leurs actions d'évacuation partout dans les situations de blackout de telle sorte que les privilèges suivants sont effectivement assurés :

- Interfaces simples et claires permettant une nette amélioration des délais d'intervention.
- Envoi, réception et affichage des informations en temps réel.
  - Message d'alerte transmis instantanément
  - Informations nécessaires pour l'évacuation immédiatement disponibles.
- L'ensemble des données nécessaires à l'évacuation et collectées préalablement sont stockées dans une base de données extrahospitalière.
- Priorisation des patients réalisée et affichée par l'application.
- Message sous format texte clairs et faciles à lire et comprendre.

En plus de ces avantages techniques très consistants, l'application améliore considérablement l'organisation du processus d'évacuation tout en réduisant les risques, les erreurs et le désordre.

### **IV.3 Architecture de l'application**

L'architecture de l'application développée, telle qu'illustrée dans la figure (IV.1), est conçue pour aider à la gestion des différentes interventions d'urgences prévues dans le processus d'évacuation du SAGIU proposé (information, orientation et contrôle), de sorte que chaque intervenant, réussissent, à son tour, à réaliser sa tâche en temps réel et en un minimum de temps.

Celle-ci se compose principalement de trois parties principales : les agents, la base de données et le serveur web.

#### **IV.3.1 Les agents**

Les agents représentent les différents acteurs impliqués dans le processus d'évacuation. Pour accéder à l'application pendant toute sa période d'exécution, il est supposé que chacun des agents possède un appareil mobile connecté à l'internet. Plusieurs propriétés des dispositifs mobiles favorisent leur utilisation dans notre travail, parmi lesquelles on peut citer (Naismith , Lonsdale, Vavoula, & Sharples , 2004):

- La portabilité : un dispositif mobile peut être utilisé en mouvement et dans plusieurs emplacements.
- L'interactivité : un appareil mobile permet d'échanger des données et collaborer avec les autres intervenants en temps réel.
- La connectivité : les dispositifs mobiles peuvent être munis d'une ou plusieurs formes de connectivité (wifi, GSM, 3G...) permettant de les relier à d'autres dispositifs mobiles ou à un réseau.

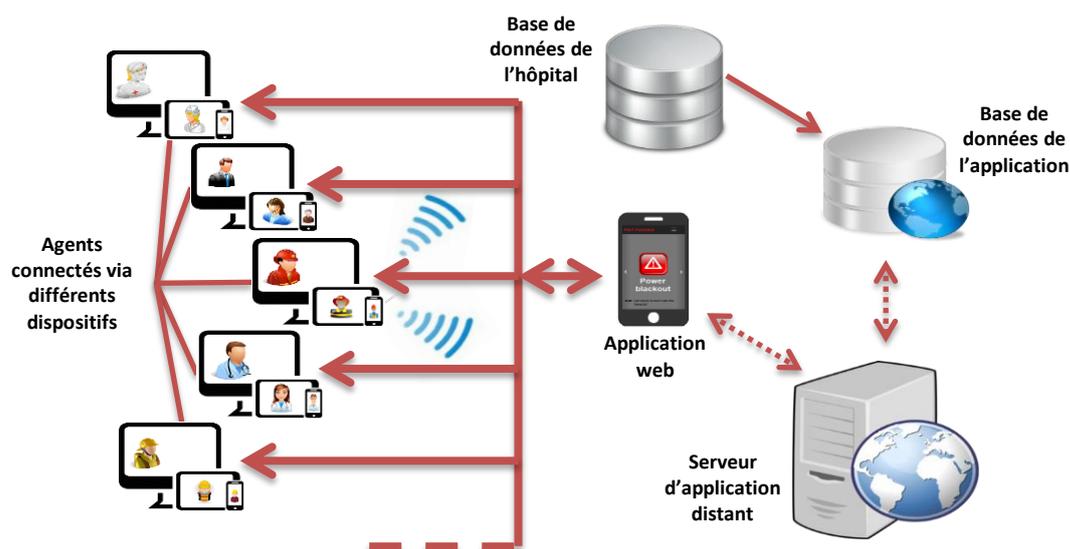


Figure IV.1. Architecture générale de l'application

### IV.3.2 La base de données

La base de données assure le stockage des données nécessaires pour le processus d'évacuation du système proposé. D'habitude, celle-ci est disponible au niveau de l'administration de l'hôpital et son utilisation pour alimenter le processus d'évacuation est généralement assurée par le personnel administratif qualifié. Cependant, cette méthode de stockage et de gestion de données n'est pas appropriée, du fait qu'elle est trop lente et que, en cas de panne électrique le réseau informatique intra hospitalier risque d'être affecté et par conséquent les étapes d'acquisition et de gestion de données seront complètement neutralisées. A cet effet, une base de données relationnelle extrahospitalière a été créée pour alimenter notre application en utilisant le langage SQL (Structured Query Language).

### IV.3.3 Le serveur web

Le serveur web open source "**Apache Tomcat**" a été sélectionné pour le traitement des données. Sa fonction est d'établir toutes les actions des différents sous processus et de les envoyer aux agents concernés par leurs exécutions.

## IV.4 Modèle de la base de données de l'application

Le modèle de la base de données que nous avons conçu pour notre application est présenté dans la figure (IV.2). Il a été formalisé en utilisant le diagramme de classe du langage de modélisation unifié standard (UML pour unified modeling language en anglais). Il est créé pour répondre aux différents besoins du système de support d'évacuation proposé. L'identification de ces besoins a été établie à partir de la littérature, à travers l'analyse des différentes conditions d'urgence en cas de panne électrique et des suggestions, interviews et des discussions avec le personnel susceptible d'être impliqués dans un processus d'évacuation de l'hôpital BOUZIDI Lakhdar de Bordj Bou Arreridj qui a été choisi comme un cas d'étude. A partir d'un stage pratique qu'on a assuré pendant un mois dans cet hôpital, toutes les données nécessaires pour construire notre modèle ont été recueillies.

Ce modèle, comme présenté dans la figure (IV.2), peut-être représenté par des groupes de classes. Le premier groupe, exhibé par les classes bleues, contient les besoins en information qui identifient des patients. Ces dernières, aident les intervenants dans le processus d'évacuation à connaître le nombre de patients à évacuer, facilitent la définition des règles de priorité du processus d'évacuation et permettent un accès rapide au lieu du patient, en particulier ceux qui dépendent du matériel électrique. Le deuxième groupe, des classes oranges, identifie les informations d'urgence telles que la classe d'incident qui définit le type et l'emplacement de la panne électrique et la classe d'alerte qui contient les informations concernant l'alerte qui se déclenche suite à l'incident électrique. Enfin, le troisième groupe contient les classes vertes qui identifient les ressources qui vont être utilisées en cas d'urgence telles que la classe d'agents contenant les informations sur les différentes parties prenantes, la classe d'action incluant les différentes actions entreprises dans le processus d'évacuation et la classe outils utilisée par la classe d'action. A l'aide de la classe « hôpital », le système, après avoir enregistré la capacité de chaque hôpital régional (nombre de lits disponibles et services médicaux), sélectionne la liste de ceux qui peuvent aider à la réception des patients évacués.

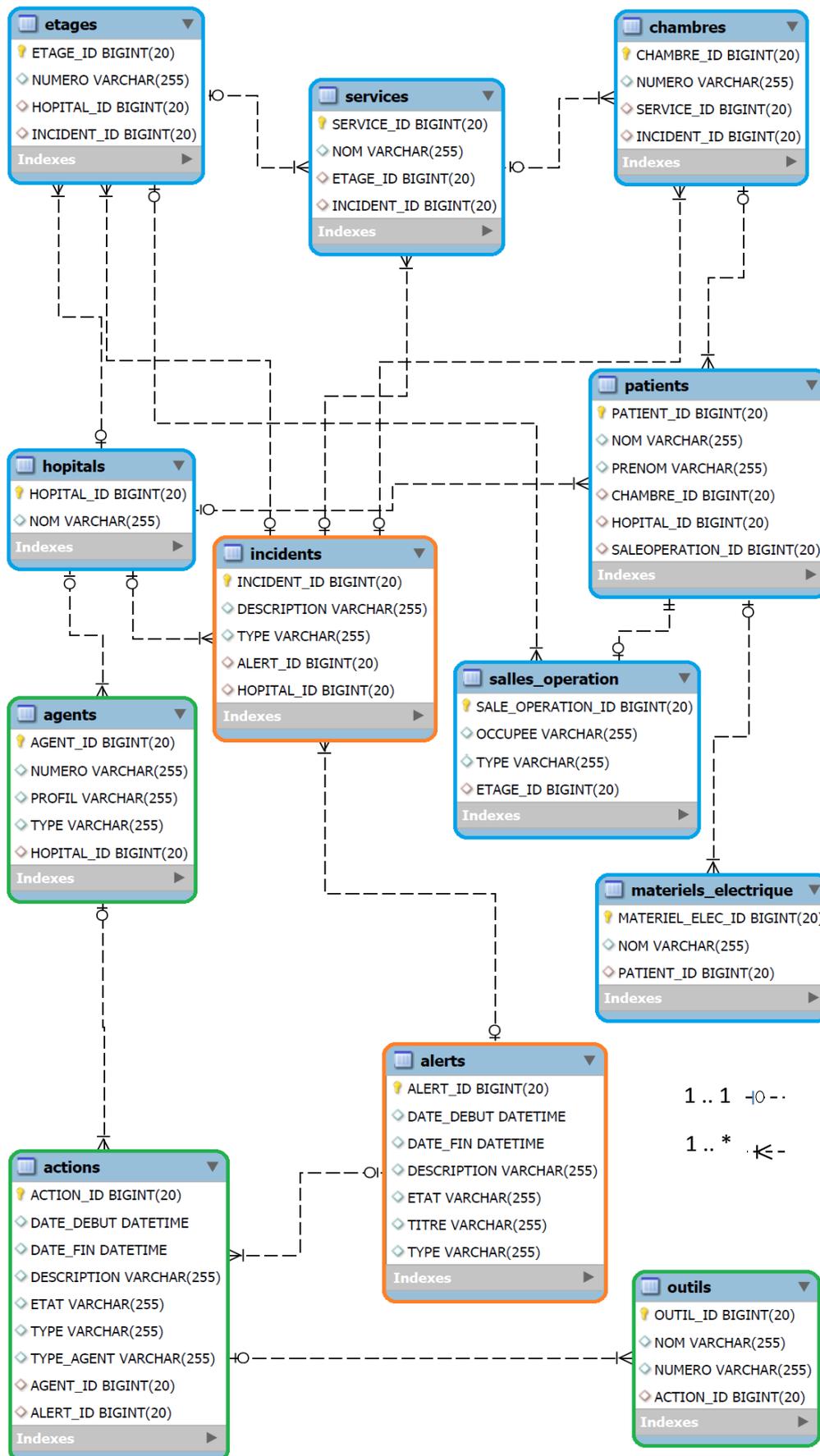


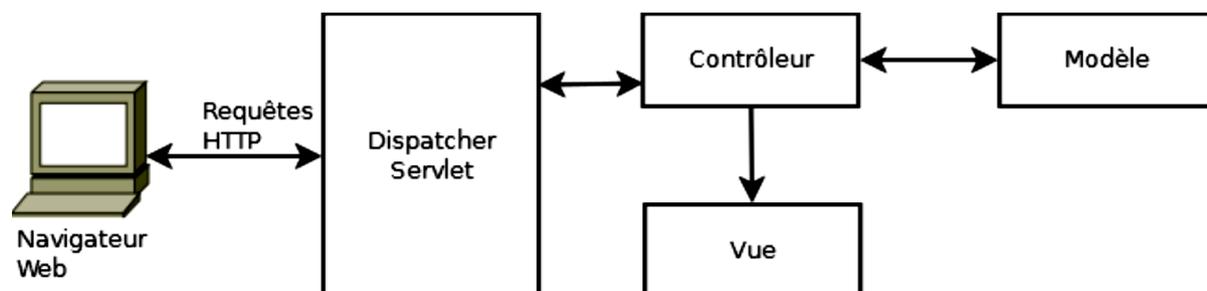
Figure IV.2. Modèle de la base de données de l'application

## IV.5 Implémentation de l'application

L'application proposée suit une structure d'application web à trois tiers. Pour ce faire, le modèle de conception Model-View-Controller (MVC) a été utilisé en raison de ses avantages en termes de réduction de l'effort nécessaire au développement d'applications et logiciels (Pouiller, 2014). Dans ce qui suit, les différents outils utilisés pour le développement de l'application vont être présentés.

### ➤ Spring MVC

Pour la mise en œuvre et la construction de l'architecture de l'application proposée, le Framework MVC "**Spring MVC**" conçu pour créer des applications Web a été utilisé. Ce Framework est robuste, flexible et bien conçu pour développer des applications web rapidement (Gupta & Govil, 2010). Il fait partie du Framework Spring qui est un Framework d'applications open source populaire qui peut faciliter le développement en langage Java EE et permet d'organiser des applications web selon le modèle de conception MVC présenté dans la figure (IV.3) dont ces différents éléments sont (Pouiller, 2014):



**Figure IV.3.** Le modèle de conception MVC (Pouiller, 2014)

- **Le Dispatcher Servlet** : cette partie est fournie par Spring. La servlet reçoit les requêtes HTTP et dirige le traitement vers le contrôleur correspondant à l'URL de la requête (mapping).
- **Le Contrôleur** : il a la charge du choix du traitement à déclencher et des informations à retourner pour la vue en fonction des entrées. Les contrôleurs exposent des services REST (Representational State Transfer) de format : **Json**.

- **Le Modèle** : il contient la partie métier. Dans notre cas, il est implémenté par des DAO (Data Access Object ou Objet d'accès aux données).
- **La Vue** : c'est la partie d'interface avec l'utilisateur qui montre comment les informations sont présentées aux utilisateurs. Dans notre cas, la technologie **JSP** (Java Server Pages) a été choisie pour afficher le contenu des pages web dans le navigateur utilisateur avec **AngularJS**.

#### ➤ **AngularJS**

Un Framework JavaScript développé par Google. Dans notre cas, il est utilisé pour consommer les services REST exposés par les contrôleurs et l'affichage des informations.

#### ➤ **Bootstrap**

Bien que l'application proposée soit conçue pour fonctionner sur différents appareils mobiles de tailles différentes (smartphone, ordinateur portable, tablette, etc.) afin de fournir aux parties prenantes le processus d'évacuation du SAGIU proposé, nous avons utilisé pour la création des interfaces de l'application, "Bootstrap", qui est un Framework open source HTML, CSS et JavaScript. Il a été choisi en raison de sa disposition de grille fluide qui s'adapte dynamiquement à la résolution d'écran appropriée (Diana, 2015). En outre, il nous a permis d'avoir des interfaces conviviales et pas beaucoup de temps et d'efforts sont nécessaires pour apprendre leur mode de fonctionnement.

#### ➤ **Hibernate**

Un Framework open source qui gère la persistance (mécanisme responsable de la sauvegarde et de la restauration des données) des objets en base de données relationnelle. Il a été utilisé pour gérer la mise à jour des données (ajouter, modifier, supprimer).

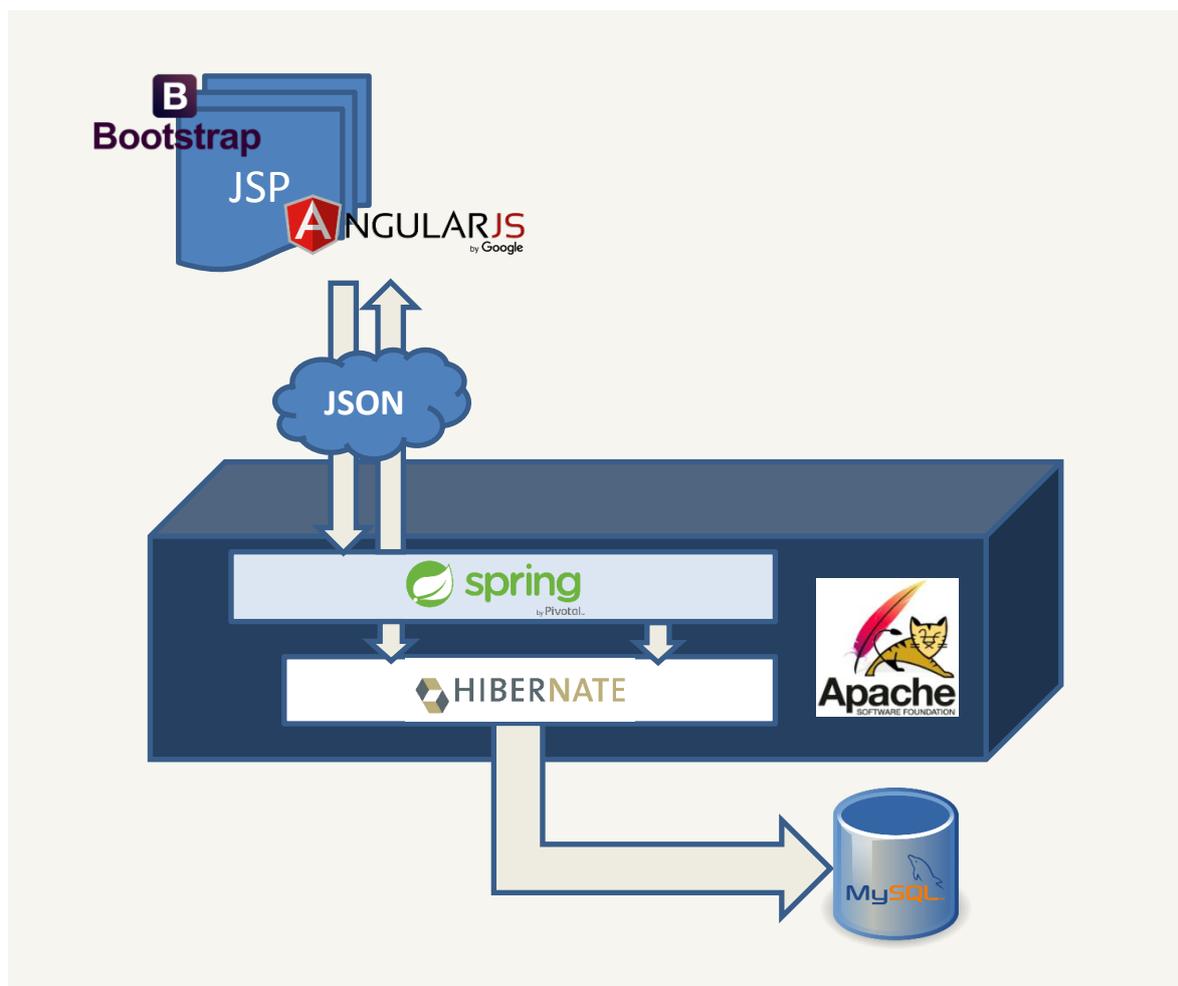
#### ➤ **MySQL**

Le serveur de base de données MySQL a été utilisé pour gérer le modèle de base de données illustré dans la section précédente.

#### ➤ **Eclipse IDE**

C'est l'environnement de développement qu'on a utilisé.

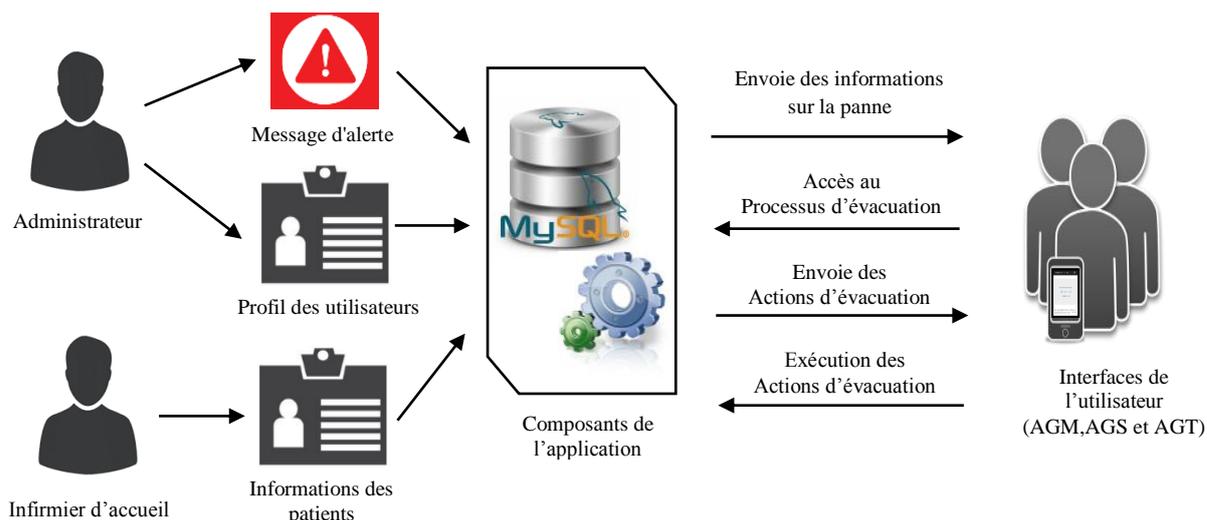
Ces différents outils ont été schématisés dans la figure (IV.4) qui illustre la relation entre eux:



**Figure IV.4.** Outils de développement de l'application proposée

## IV.6 Fonctions de l'application

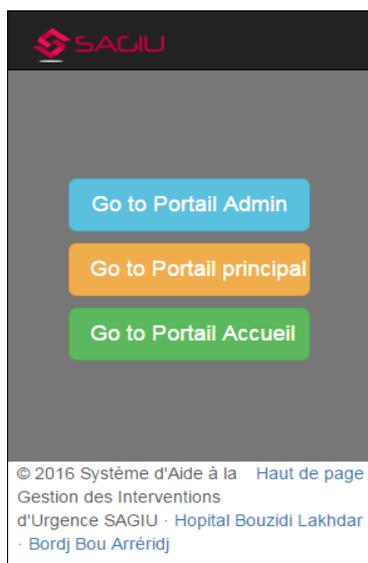
L'application web mobile proposée est destinée à un groupe très spécifique d'utilisateurs qui incluent les différentes parties prenantes impliquées dans le processus d'évacuation. Afin d'établir son processus de développement général, il est nécessaire de définir la fonction de chaque page web de cette application. Ces fonctions incluent l'authentification des utilisateurs, le déclenchement de l'alerte, les actions du processus d'évacuation et la gestion des patients comme indiqué dans la figure (IV.5). Le processus d'évacuation reste, cependant, le cœur de cette application. Il représente la fonction principale du modèle de la base de données.



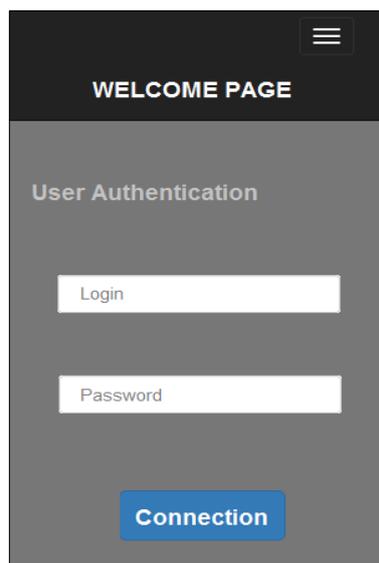
**Figure IV.5.** Mécanisme de l'application

### IV.6.1 Authentification des utilisateurs

Comme indiqué dans la figure (IV.6), les utilisateurs qui ont des rôles en communs accèdent au même portail (6.1) via la page d'accueil dont chacun utilise son propre compte composé d'un login et d'un mot de passe fournis par l'administrateur responsable (6.2).



(6.1)



(6.2)

**Figure IV.6.** Authentification des utilisateurs

## IV.6.2 Gestion des patients (Portail d'accueil)

Cette fonction, telle que présentée dans les figures (IV.7) et (IV.8), permet de saisir et afficher l'ensemble de données sur les patients hospitalisés et qui sont nécessaires durant le processus d'évacuation, particulièrement, leurs noms complets, le service et la chambre où ils se trouvent et leurs états (autonomes ou pas et dépendants ou non du matériel électrique).

© 2016 Système d'Aide à la Gestion des Interventions d'Urgence SAGIU - Hopital Bouzidi Lakhdar - Bordj Bou Arréridj [Haut de page](#)

**Figure IV.7.** Ajouter un nouveau patient

© 2016 Système d'Aide à la Gestion des Interventions d'Urgence SAGIU - Hopital Bouzidi Lakhdar - Bordj Bou Arréridj [Haut de page](#)

Nom	Prénom	Etat d'évacuation	Service	Chambre
Bentoumi	Said	Patient non autonome	Orthopédie	24
Sedaoui	Hamid	Patient sous matériel électrique et non autonome	Réanimation	11
Mokrani	Naima	Patient autonome	Infectiologie	41
Fandi	Khaoula	Patient sous matériel électrique et non autonome	Radiologie	06
Yahyaoui	Fadila	Patient sous matériel électrique et non autonome	Hémodialyse	04
karra	Lamine	Patient non autonome	Orthopédie	24
Bensaadi	Karim	Patient non autonome	Pneumologie	38
Maaouchi	Tamime	Patient autonome	ORL	16

**Figure IV.8.** Liste des patients hospitalisés

L'intervenant en charge de cette fonction est habituellement un membre de l'administration de l'hôpital ou les infirmières d'accueil. Ces données, impérativement mises à jour 24h / 7j, sont nécessaires pour fournir au système tous les paramètres dont il a besoin pour créer le processus d'évacuation et permettre par ailleurs une exécution rapide et efficace des différentes actions s'y afférant.

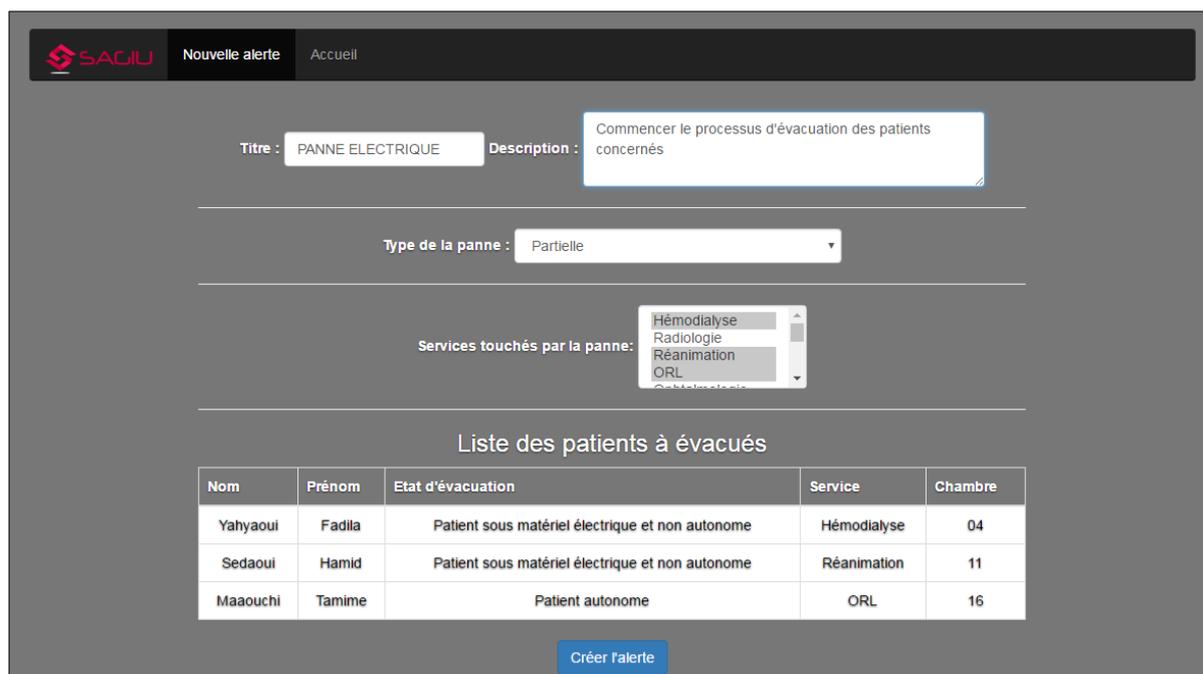
### IV.6.3 Déclenchement de l'alerte (Portail admin)

Une utilisation typique de l'application proposée pour cette fonction est représentée sur la figure (IV.9) à travers un scénario A.

Dans le scénario A de la figure (IV.9) consacré au déclenchement de l'alerte, l'application est initiée par une panne de courant à l'intérieur de l'hôpital, ce qui provoque la décision d'évacuer les patients concernés. A cet effet, l'administrateur de l'hôpital crée et transmet, immédiatement à travers l'application, un message d'alerte aux autres parties prenantes les informant de la survenue de la panne d'électricité. Pour ce faire, il sélectionne d'abord le bouton « Déclencher une alerte » dans l'interface de la figure (9.1) puis, il donne les détails de la panne dans la figure (9.2) avant de les envoyer sous forme de message en cliquant sur le bouton «Créer l'alerte». Selon ces détails, la liste des patients concernés par l'évacuation est préparée et affichée par le système. Dans l'interface de la figure (9.3), un exemple de message d'alerte d'urgence est affiché.



(9.1)



(9.2)



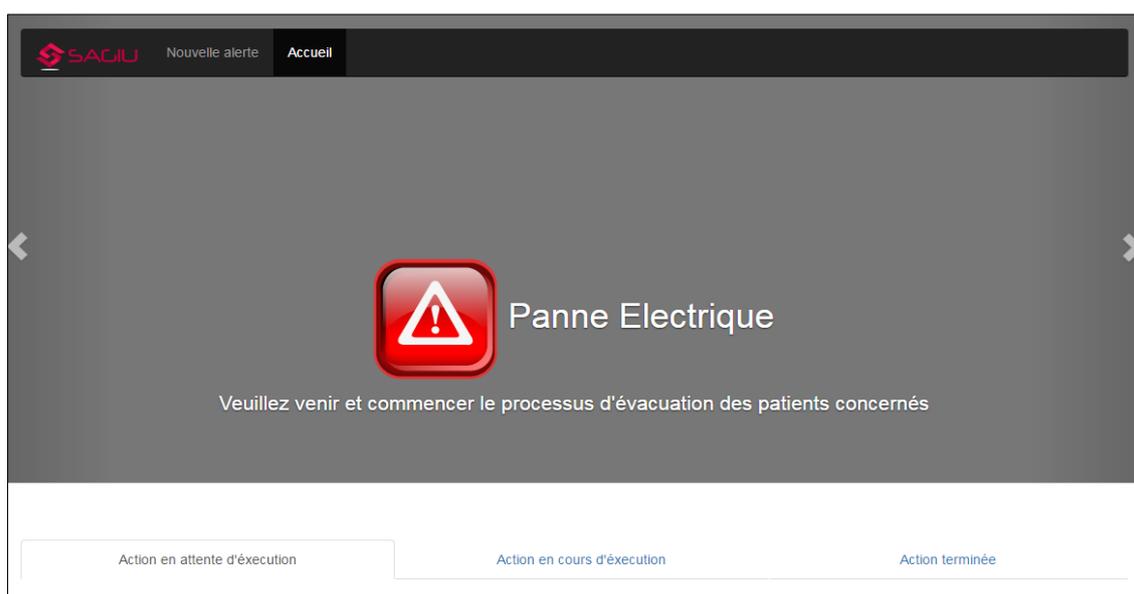
(9.3)

**Figure IV.9. Scenario A : Déclenchement d'une alerte**

#### IV.6.4 Exécution des actions du processus d'évacuation (Portail principal)

Une utilisation typique de l'application proposée pour cette fonction l'exécution des actions du processus d'évacuation est représentée sur les figures (IV.11), (IV.12) et (IV.13) à travers une série de scénarios successifs.

Selon le message d'alerte, le système définit la liste des patients concernés par l'évacuation, les priorise, crée le processus d'évacuation approprié et l'affiche sur la page d'accueil. Le processus d'évacuation se compose de trois types d'actions qui sont : les actions en attente d'exécution, les actions en cours d'exécution et les actions terminées. Le système affiche ces actions selon l'ordre de priorité des patients comme expliqué dans le chapitre précédent. Comme le montre la figure (IV.10), une colonne spécifique est utilisée pour afficher chacune d'entre elles, comme illustré sur l'exemple de la tablette (10.1) et l'écran de téléphone mobile (10.2).



(10.1)



(10.2)

**Figure IV.10.** Phases d'exécution des actions

Pour chaque action en attente d'exécution sont affichés sur l'interface : la description de l'action, le nom et la localisation du patient concerné, l'ensemble des ressources indispensables pour réaliser l'action (nombre et type) et un bouton nommé "Exécuter". Pour exécuter une telle action, l'intervenant doit appuyer sur le bouton "Exécuter" ; le système procède alors automatiquement au changement de son type vers "Actions en cours d'exécution". Une fois l'action terminée, l'intervenant appuie sur le bouton "Terminer" et le système transfère cette action vers la troisième colonne nommée "Actions terminées" pour indiquer que l'exécution de cette action est bien achevée. Le processus d'évacuation se termine lorsque toutes les actions se trouvent dans la troisième colonne.

#### IV.6.4.a Scénario d'une action de préparation d'un patient

Le scénario B représente l'action de préparation de l'évacuation d'un patient telle qu'illustré sur la figure (IV.11). Cette action qui incombe au personnel médical est basée sur les informations nécessaires fournies par le système avant l'exécution notamment, toutes les informations concernant le patient ainsi que le nombre et le type de ressources requises, comme illustré dans l'exemple de l'interface (11.1). Dès que ces ressources sont rassemblées, l'action de préparation de l'évacuation du patient est exécutée à l'image de l'exemple donné dans les interfaces (11.2) et (11.3) dont on peut également connaître la date de début et de fin de cette action.



**Figure IV.11.** Scénario B : Exemple d'une action de préparation d'un patient.

#### IV.6.4.b Scénario d'une action de transport d'un patient au rez-de-chaussée

Le scénario C de la figure (IV.12) représente la deuxième étape d'évacuation d'un patient. Cette action est entreprise par les pompiers et commence instantanément lorsque l'action de préparation du patient est terminée. Dans ce scénario, les pompiers sont invités à aider le personnel médical pour déplacer le patient vers le rez-de-chaussée dès qu'ils extraient les informations nécessaires (nombre et types des ressources nécessaires), comme illustré dans la figure (IV.12).



**Figure IV.12.** Scénario C : Exemple d'une action de transport d'un patient (1<sup>ère</sup> étape).

#### IV.6.4.c Scénario d'une action de transport d'un patient vers un autre hôpital

Le scénario D présenté dans la figure (IV.13) dédié aux ambulanciers, représente la dernière étape d'évacuation d'un patient. Cette action commence immédiatement lorsque l'action de déplacement du patient de sa chambre vers le rez-de-chaussée est terminée. Dans ce scénario, les ambulanciers sont invités à aider le personnel médical pour transporter le patient vers un autre hôpital défini par le système dès qu'ils extraient les autres informations nécessaires (nombre et types des ressources nécessaires), comme illustré dans la figure (IV.13).



**Figure IV.13.** Scenario D : Exemple d'une action de transport d'un patient (2<sup>ème</sup> étape).

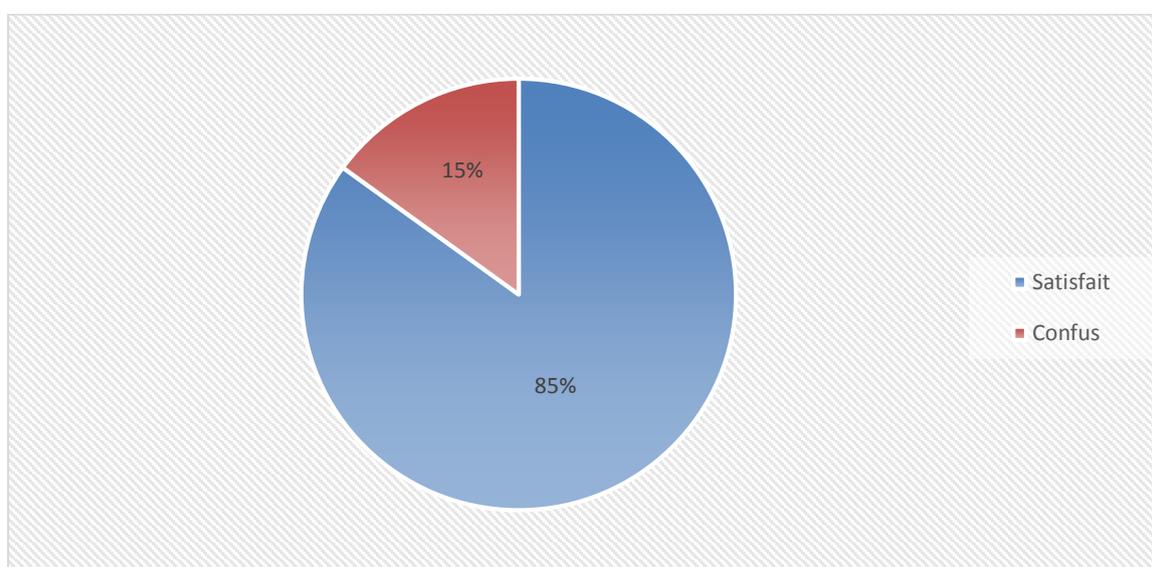
## IV.7 Test et validation

Les tests de performance et la validation de l'application ont été réalisés en deux étapes successives. Dans la première étape, nous avons tout d'abord testé les fonctions de l'application proposée en termes de facilité de compréhension et d'exécution par les différents types d'intervenants. Dans la deuxième étape, une exécution réelle de l'application dans un milieu hospitalier a été réalisée dans le but de faire une étude comparative avec les solutions classiques qui utilisent généralement des lignes téléphoniques, des hauts parleurs, des interphones, des contacts directs et des registres sous forme papier. À cette fin, nous avons dans un premier temps effectué un stage d'un mois au niveau de l'hôpital Bouzidi Lakhdar situé à Bordj Bou Arreridj. L'étude détaillée des circonstances pratiques liées au problème d'évacuation ainsi que la synthèse des interviews et des questionnaires réalisés avec le personnel nous ont permis de collecter un ensemble consistant de données réelles qui a servi de plateforme pour notre application (Voir Annexe).

Des intervenants impliqués dans le processus d'évacuation (3 médecins, 4 infirmières et 2 administrateurs) ont été invités à participer aux deux étapes de tests et de validation.

Afin d'évaluer la facilité de compréhension et d'exécution des fonctions, l'application a été mise à la disposition des différentes parties prenantes tout en les incitant à l'utiliser d'une manière autonome. Comme montré dans la figure (IV.14), la majorité d'entre eux ont pu

comprendre toutes les fonctionnalités en quelques minutes (3-4 minutes), ce qui signifie que l'application est simple et ne nécessite pas beaucoup d'efforts et de temps pour être comprise et utilisée. Cet avantage dans la solution proposée s'avère donc très bénéfique du moment qu'il permet de gagner du temps lors de l'exécution du processus d'évacuation.



**Figure IV.14.** *Opinions des utilisateurs sur la facilité d'utilisation de l'application*

Dans la deuxième étape les intervenants ont dû réaliser successivement deux scénarios différents où le cas d'urgence a été établi par la simulation de la survenue d'une panne électrique :

- 1<sup>er</sup> scénario : la solution proposée est utilisée.
- 2<sup>ème</sup> scénario : la solution classique est utilisée.

Afin d'évaluer les performances et l'efficacité de chaque scénario, sept indicateurs ont été pris en compte :

- Temps nécessaire pour transmettre les informations sur la panne d'électricité.
- Qualité des informations reçues sur la panne.
- Temps nécessaire pour obtenir les informations des patients.
- Qualité des informations reçues sur les patients.
- Temps pris pour donner l'ordre de priorité aux patients.
- Qualité de l'ordre de priorité proposé des patients.
- Temps nécessaire pour commencer l'évacuation d'un patient.

Les résultats sont donnés dans le tableau (IV.1) (Attia, Boubetra, & Saad Saoud, 2016) :

**Tableau IV.1.** Estimation des indicateurs avec et sans la solution proposée

Indicateurs	Avec la solution proposée (Valeur moyenne)	Sans la solution proposée (Valeur moyenne)
Temps nécessaire pour transmettre les informations sur la panne d'électricité	0.50 min	3.45 min
Qualité des informations reçues sur la panne	Bonne	mauvaise
Temps nécessaire pour obtenir les informations des patients	0.30 min	5.20 min
Qualité des informations reçues sur patients	Bonne	mauvaise
Temps pris pour donner la priorité aux patients	0.23 min	6.40 min
Qualité de l'ordre de priorité proposé des patients	Très bonne	mauvaise
Temps nécessaire pour démarrer l'évacuation d'un patient	2.35 min	18.55 min

Le temps moyen pour transmettre les informations sur la panne d'électricité et pour effectuer l'appel d'urgence a été réduit d'une moyenne de 3,45 min à 0,50 min, avec une qualité des informations, bien meilleurs (correctes, complètes et permanentes). Le 2<sup>ème</sup> scénario, par contre, a présenté une qualité d'information moins bonne et a pris plus de temps pour obtenir les informations des patients. En outre, le temps nécessaire pour commencer l'évacuation des patients avec la solution proposée était beaucoup plus rapide que celui du cas classique. En résumé, cela implique une réduction du temps total moyen pour toutes les actions du processus d'évacuation, y compris l'envoi de l'appel d'urgence, l'obtention des informations des patients, la priorité des patients et le début d'une évacuation des patients.

## IV.8 Discussion et conclusion

A partir des résultats des tests et de validation obtenus sous forme d'indicateurs et qui sont donnés dans le tableau (IV.1), on peut aisément remarquer que la solution proposée est beaucoup plus performante que les méthodes classiques. D'une part, elle permet une exécution plus rapide du processus d'évacuation. Ceci est essentiellement due au fait que dans

l'application mobile proposée, les messages d'information, contrairement au cas classique, sont diffusés instantanément en temps réel et sans aucun échec vers toutes les parties prenantes impliquées. D'autre part, la qualité de l'information reçue est bien meilleure puisque les messages atteignent les appareils mobiles des parties prenantes sous format de texte mémorable, permettant une réduction considérable des erreurs de lecture et d'incompréhension lors du processus d'évacuation.

De plus, bien que l'application web mobile proposée est adaptable à tout dispositif connecté à Internet, elle assure une parfaite coordination entre les parties prenantes et une meilleure organisation et priorisation des différentes actions du processus d'évacuation. Ces caractéristiques, par opposition aux méthodes classiques, assure une meilleure efficacité et permettent également d'économiser encore plus de temps et donc, de sauver plus de vies.

En utilisant cette application, le temps consommé pour l'exécution de chaque action est enregistré ce qui permet aux administrateurs et aux décideurs de connaître le temps général du processus d'évacuation pour l'optimiser dans le futur.

Dans ce chapitre, nous avons donc développé une application pour le SAGIU proposé au troisième chapitre qui est basée sur l'utilisation de la technologie web-mobile. Cette dernière, a permis grâce à ces avantages une amélioration considérable des performances du SAGIU proposé en termes d'efficacité, de qualité d'information et de réduction du temps d'évacuation.

# Conclusion générale

Les infrastructures critiques sont constituées de l'ensemble des grands réseaux d'électricité, d'eau potable, de gaz, et beaucoup d'autres qui sont indispensables au bon fonctionnement des sociétés modernes. Leur sécurisation est donc, par nature, un enjeu majeur pour ces sociétés. Quand un problème survient dans l'une de ces infrastructures, il peut provoquer l'interruption des services non seulement au sein de cette infrastructure, mais également dans d'autres ICs. Ce qui qualifie la gestion de ces ICs comme une composante essentielle dans la politique de sécurisation économique et sociale des pays.

Dans ce travail nous nous sommes intéressés à la relation de dépendance existante entre les infrastructures hospitalières et celles du réseau électrique. Celle-ci a été définie comme une étude de cas sur laquelle notre travail de recherche s'est articulé. Il est évident que certaines victimes d'une défaillance électrique peuvent mourir en un très peu de temps si le processus d'évacuation n'est pas suffisamment rapide, sûr et bien organisé. Par conséquent, la manière de réagir à une telle problématique est devenue une question cruciale.

Aussi, cette thèse s'est orientée principalement vers le développement d'un système d'aide à la gestion des interventions d'urgence du processus d'évacuation en cas d'une panne électrique basé sur la création des scénarios prescriptifs de simulation au sein d'une application web mobile. Pour réaliser cet objectif nous avons défini, dans une première étape purement théorique, les secteurs et les sources d'alimentation électrique tout en soulignant leur importance au sein des hôpitaux. Nous avons également établi les différentes causes de défaillance électrique et leurs impacts. Dans cette même étape nous avons aussi présenté la démarche de sûreté de fonctionnement des installations électriques et la démarche de la gestion des risques électriques dans les établissements de santé. Cette étude préliminaire a conduit au fait que malgré toutes les mesures existantes de sécurité, les hôpitaux restent loin d'être à l'abri des catastrophes et sont souvent obligés de procéder à l'évacuation des patients.

Dans la deuxième étape de notre travail, une étude approfondie a été réalisée sur les travaux de recherche concernant le processus d'évacuation des hôpitaux. Le premier constat fut l'absence totale de recherche visant les problèmes d'évacuation causés par une panne électrique. Ceci nous a poussés à investiguer plusieurs cas réels liés à cette problématique et de faire en parallèle un stage pratique au niveau de l'hôpital « Bouzidi Lakhdar » de Bordj Bou Arréridj. Nous avons pu, ainsi, recensés les différents problèmes qui entravent les actions des intervenants impliqués dans le processus d'évacuation et de collecter les données réelles indispensable à la réalisation de notre objectif.

Dans la dernière phase de notre travail nous avons présenté notre contribution principale caractérisée, d'une part, par la proposition de la solution «SAGIU » et la description détaillée de ces différentes étapes de développement, et d'autre part par son implémentation au sein d'une application web-mobile. La solution proposée s'est penchée principalement sur l'amélioration du temps d'exécution, de l'efficacité organisationnelle dans les différentes actions du processus d'évacuation rencontrées dans l'identification, la priorisation, la préparation et le transport des patients à évacuer et de la communication entre les différentes parties prenantes.

Les performances de la solution proposée ont été évaluées grâce à un test de simulation d'une panne électrique au sein de l'hôpital Bouzidi Lakhdar. Les résultats ont montré que l'utilisation d'un tel SAGIU au sein d'une application web mobile basé sur la création des scénarios prescriptifs de simulation, présentait de nombreux avantages par rapport aux solutions classiques , notamment un temps de traitement nettement plus court, une meilleure qualité des informations, des interfaces conviviales et des données facilement accessibles à partir de n'importe quel emplacement et périphériques connecté à l'Internet. Toutes ces caractéristiques et avantages confirment la validité du système proposé.

Cependant, il faut noter qu'une défaillance électrique n'est pas le seul problème qui peut mettre en danger la vie des patients dans une infrastructure hospitalière, on peut citer à titre d'exemple une fuite de gaz ou un incendie. Comme perspective, on proposerait la généralisation de notre SAGIU pour tous les types de défaillances possibles liés à des infrastructures interdépendantes avec l'infrastructure sanitaire en créant pour chaque type l'ensemble adéquat des scénarios prescriptifs et adaptatifs de simulation approprié.

# Références bibliographiques

- Adalja, A. A., Watson, M., Bouri, N., Minton, K., Morhard, R. C., & Toner, E. S. (2014). Absorbing citywide patient surge during Hurricane Sandy: a case study in accommodating multiple hospital evacuations. *Annals of emergency medicine*, 64(1), 66 -73.
- Alazawi, Z., Alani, O., Abdljabar, M. B., & Mehmoud, R. (2014). An Intelligent Disaster Management System Based Evacuation Strategies. *Communication Systems, Networks & Digital Signal* , (pp. 673 -678).
- Arboleda, C. A. (2006). *Vulnerability assessment of the operation of health care facilities during disaster events*. West Lafayette, Indiana: Purdue University.
- Arboleda, C. A., Abraham, D. M., Richard, J., & Lubitz, R. (2009). Vulnerability assessment of health care facilities during disaster events. *Journal of Infrastructure Systems*, 149-161.
- Assistance publique - Hopitaux paris. (2005). *conditions techniques d'alimentation électrique des établissements de santé publics et privés*. Paris: Direction des affaires juridiques.
- Attia, S., Boubetra, A., & Saad Saoud, M. (2014). Decision making issues related to critical infrastructures interdependencies management. *Journal of Advances in Computer Networks*, 2(1).
- Attia, S., Boubetra, A., & Saad Saoud, M. (2016). Development of an Emergency Response Management using Mobile Devices for Hospital Infrastructures Affected by Power Grid Failures. *International Journal of Healthcare Information Systems and Informatics*.
- Augustine, J., & Schoettmer, J. T. (2005). Evacuation of a rural community hospital: lessons learned from an unplanned event . *Disaster management and response* , 68 -72.
- Aved, A., Ho, A. H., Hua, K., Hoang, L. T., & Hamza-Lup, G. L. (2006). A mobile computing approach to automatic traffic evacuation management. *The IEEE Intelligent Transportation Systems conference*, (pp. 85 -90).
- Ayyub, B. M., & McCuen, R. H. (2011). *Probability, Statistics and Reliability for Engineers and Scientists*. CRC press.
- Bagheri, E., Baghi, H., Ghorbani, A. A., & Yari, A. (2007). An agent-based service-oriented simulation suite for critical infrastructure behaviour analysis. *International Journal of Business Process Integration and Management*, 2(4), 312-326.
- Barton, D. C., & Stamber, K. L. (2000). An agent-based microsimulation of critical infrastructure systems. *8th International Energy Forum*. Las Vegas, NV (US): Sandia National Labs.
- Barton, D. C., Eidson, E. D., Schoenwald, D. A., Stamber, K. L., & Reinert, R. (2000). *Aspen-ee: An agent-based model of infrastructure interdependency*. US: Sandia National Laboratories.
- Basu, N., Pryor, R., & Quint, T. (1996). ASPEN : A microsimulation model of the economy. *Computational Economics*, 12(3), 223-241.
- Beatty, M. E., Phelps, S., Rohner, C., & Weisfuse, I. (2006). Blackout of 2003: public health effects and emergency response. *Public Health Reports*, 121, 36-44.
- Benoit, R. (2009, Juillet 8). La sécurisation des infrastructures critiques : recherche d'une méthodologie d'identification des vulnérabilités et modélisation des interdépendances. *Thèse de doctorat*. Grenoble, Ecole Doctorale « Électronique, Électrotechnique, Automatique et Traitement du Signal », France.

- Benoît, R. (2013). Infrastructures critiques interdépendantes : de la protection à la résilience. *Conférence public*. Mons.
- Berlin. (2008). *Protection des infrastructures critiques – gestion des risques et des crises*.
- Blaser, M. J., & Ellison, R. T. (1985). Rapid nighttime evacuation of a veterans hospital . *The journal of emergency medicine*, 387 -394 .
- Bosse, T., Hoogendoorn, M., Klein, M., Sharpanskyk, A., Treur, J., van der Wal, C. N., & van Wissen, A. (2013). Agent-based modelling of social emotional decision making in emergency situations. *Co-evolution of Intelligent Socio-technical Systems* (pp. 79 - 117). Springer Berlin Heidelberg.
- Brown, J. (2004). Providing emergency care during a power outage: August 2003. *Disaster Management and Response*, 2(1), 20-23.
- Burgess, J. L. (1999). Hospital evacuations due to hazardous materials incidents The American journal of emergency medicine. *The American journal of emergency medicine* , 50-52.
- Carpenter, T., & Robinson, S. T. (2010). Response to a partial power failure in the operating room. *Anesthesia and Analgesia*, 110(6), 1644-1646.
- Casalichio, E., Galli, E., & Tucci, S. (2007). Federated agent-based modeling and simulation approach to study interdependencies in IT critical infrastructures. *Distributed Simulation and Real-Time Applications, 2007. DS-RT 2007. 11th IEEE International Symposium* (pp. 182-189). IEEE.
- Chaffee, M. W. (2005). Hospital response to acute-onset disasters: the state of the science in 2005. *Nursing Clinics of North America*, 40(3), 565-577.
- Chen, W., Guinet, A., & Ruiz, A. (2015). Modeling and simulation of a hospital evacuation before a forecasted flood. *Operations Research for Health Care*, 36-43.
- Chtiha , H., Aboulay , K., Assier , Y., & Cardinale, F. (2008). *Maîtrise de l'installation électrique au bloc opératoire*. Projet Management des Organisations Biomédicales, MASTER Management des Technologies en Santé.
- De-Ching, H., Shen-Wen, C., Chien-Hung, L., Po-Ta, H., Yi-Ting, S., & Huei-Ru, S. (2011). A study for the evacuation of hospital on fire during construction. *Procedia Engineering*, 139 -146.
- Département fédéral de la défense. (2015). *Guide pour la protection des infrastructures critiques*. Suisse: Office fédéral de la protection de la population.
- Diana, C. (2015, 08 21). *To use or not to use Bootstrap framework?* (Creative Tim) Retrieved 12 28, 2015, from <http://blog.creative-tim.com/web-design/use-not-use-bootstrap-framework/>
- Diesel service and supply. (2013). *The Importance of Backup Power for Commercial Facilities*. Récupéré sur diesel service and supply: [http://www.dieselserviceandsupply.com/Backup\\_Power\\_for\\_Commercial\\_Facilities.a.spx](http://www.dieselserviceandsupply.com/Backup_Power_for_Commercial_Facilities.a.spx)
- Direction Générale de l'Action Sociale. (2009). *Analyse des Risques liés à la Défaillance en Energie : le DARDE*.
- Dudenhoeffer, D. D., Permann, M. R., & Manic, M. (2006). CIMS: A Framework for Infrastructure Interdependency Modeling and Analysis. *the 38th conference on Winter simulation* (pp. 478-485). Winter Simulation Conference.
- Eachempati, S. R., Mick, S., & Barie, P. S. (2004). The impact of the 2003 blackout on a Level 1 trauma center: lessons learned and implications for injury prevention. *Journal of Trauma and Acute Care Surgery*, 1127-1131.
- Ellison, R. J., Mead, N. R., Longstaff , T. A., & Linger, R. C. (2000). The Survivability Imperative: Protecting Critical Systems. *Defense Software Engineering*.

- ElMoujahid press. (2014, 03 18). *Fire in the pediatric department of Bordj Bou Arreridj hospital: No casualties*. Retrieved 12 27, 2015, from ElMoujahid: <http://www.elmoudjahid.com/fr/flash-actu/13297>
- Farrell, A. E., Zeriffi, H., & Dowlatabadi, H. (2004). Energy infrastructure and security. *Annual Review of Environment and Resources*, 29, 421-469.
- Filippini, R., Giannopoulos, G., & Schimmer, M. (2012). *Risk assessment methodologies for Critical Infrastructure Protection. Part I: A state of the art*. Luxembourg: Publications Office of the European Union.
- Galli, E. (2010). Agent Based Modeling and Simulation for critical and interdependent systems. *Thèse de doctorat*. Université de Rome.
- Golmohammadi, D., & Shimshak, D. (2011). Estimation of the evacuation time in an emergency situation in hospitals. *Computers and Industrial Engineering*, 1256-1267.
- Gupta , P., & Govil, M. (2010). Spring Web MVC Framework for Rapid Open Source J2EE Application Development: A Case Study. *International Journal of Engineering Science and Technology*, 2(6), 1684 -1689.
- Haimes, Y. Y. (1998). *Risk Modeling, Assessment, and Management*. New York: John Wiley & Sons.
- Hale, A. R., & Swuste, P. (1998). Safety rules: procedural freedom or action constraint? *Safety science*, 29(3), 163-158.
- Hargrove, M., Ramish, B. C., O'Donnell, A., & Aherne, T. (2002). Electrical failure during cardiopulmonary bypass: an evaluation of incidence, causes, management and guidelines for preventative measures. *Perfusion*, 17(5), 369-372.
- Hiete, M., Merz, M., & Schultmann, F. (2011). Scenario-based impact analysis of a power outage on healthcare facilities in Germany. *International Journal of Disaster Resilience in the Built Environment*, 222-244.
- Jiang, Z. M., Zhang, P. H., Shang, R. X., & Tian, X. L. (2014). Investigation and simulation on human evacuation behaviour in large hospital building in Shenyang. *Procedia engineering*, 71, 101 -106.
- Johnson, C. W. (2006 ). Using computer simulations to support a risk-based approach . *Technical report, A Department of Computing Science Briefing* .
- Journé, B. (2001). La prise de décision dans les organisations à haute fiabilité : entre risque d'accident et risque bureaucratique. Dans *Organisation et stratégies industrielles* (pp. 101-126). Cahier de l'Artémis.
- Kader, S. (2008). Development of design strategies to support evacuation process of hospital buildings in United States. Texas A&M University .
- Klein, K. R., osenthal, M. S., & Klausner, H. A. (2005). Blackout 2003: preparedness and lessons learned from the perspectives of four hospitals. *Prehospital and Disaster Medicine*, 20(5), 343-349.
- Klinger, C., & Owen Landeg, V. M. (2014 ). Power Outages, Extreme Events and Health: a Systematic Review of the Literature from 2011-2012 . PLoS currents.
- Kobes, M., Helsloot, I., de Vries, B., & Post, J. G. (2010). Building safety and human behaviour in fire: A literature review . *Fire Safety Journal* , 1 -11.
- Leitch, M. (2010). ISO 31000:2009 – the new international standard on risk management. *Risk Analysis*, 30, 887-892.
- LeParisien press. (2013, 09 19). *The red plan triggered the Antony hospital*. Retrieved 12 27, 2015, from LeParisien: <http://www.leparisien.fr/espace-premium/hauts-de-seine-92/le-plan-rouge-declenche-a-l-hopital-d-antony-19-09-2013-3148967.php>
- Liu, X., Liu, Y., Zhang, L., Liang, W., Zhu, Z., Shen, Y., & Liu, Z. (2013 ). Mass aeromedical evacuation of patients in an emergency: experience following the 2010 yushu earthquake. *The journal of emergency medecine* , 865 -871.

- L'OBS Monde press. (2012, 10 30). *Evacuation of 200 patients from New York hospital after a power failure*. Retrieved 12 27, 2015, from L'OBS Monde: <http://tempsreel.nouvelobs.com/monde/20121030.FAP2537/evacuation-de-200-patients-de-l-hopital-de-new-york-apres-une-panne-de-courant.html>
- Manley, W. G., Furbee, P. M., Coben, J. H., Smyth, S. K., Summers, D. E., Althouse, R. C., . . . Helmkamp, J. C. (2006). Realities of disaster preparedness in rural hospitals. *Disaster Management and Response*, 4(3), 80-87.
- Masucci, V., Adinolfi, F., Servillo, P., Dipoppa, G., & Tofani, A. (2009). Ontology-based critical infrastructure modeling and simulation. *International Conference on Critical Infrastructure Protection* (pp. 229-242). Berlin Heidelberg: Springer.
- Metronews press. (2013, 03 06). *Créteil : a power outage causing mayhem at the hospital*. Retrieved 12 27, 2015, from Metronews: <http://www.metronews.fr/paris/creteil-une-coupure-d-electricite-seme-la-pagaille-a-l-hopital/mmcfrsR2uca4z8Xt6/>
- Mikulik, J., Cempel, W. A., Kracik, S., & Dabal, D. (2014). A simulation model for emergency evacuation time and low-cost improvements of a hospital facility using FlexSim healthcare: a case study. *Intelligent Systems in Technical and Medical Diagnostics* (pp. 333 -342). Springer Berlin Heidelberg.
- Milsten, A. (2000). Hospital responses to acute-onset disasters: a review. *Prehospital and Disaster Medicine*, 15(1), 32-45.
- Murphy, D. M., & Paté-Cornell, M. E. (1996). The SAM framework: A Systems Analysis Approach to Modeling the Effects of Management on Human Behavior in Risk Analysis. *Risk Analysis*, 16(4), 501-515.
- Naismith, L., Lonsdale, P., Vavoula, G., & Sharples, M. (2004). *literature Review in Mobile Technologies and Learning*. Futurelab series.
- NFPA. (2006). *National Life Protection Association (NFPA)*. Life Safety Code.
- Niwa, T., Okaya, M., & Takahashi, T. (2015). TENDENKO: Agent-Based Evacuation Drill and Emergency Planning System. *Multi-Agent-Based Simulation, Springer International Publishing*.
- Norcross, E. D., Elliott, B. M., Adams, D. B., & Crawford, F. A. (1993). Impact of a major hurricane on surgical services in a university hospital. *The American Surgeon*, 59(1), 28-33.
- Oh, E. H., Deshmukh, A., & Hastak, M. (2010). Disaster impact analysis based on inter-relationship of critical infrastructure and associated industries: a winter flood disaster event. *International Journal of Disaster Resilience in the Built Environment*, 1(1), 25-49.
- O'hara, J. F., & Higgins, T. L. (1992). Total electrical power failure in a cardiothoracic intensive care unit. *Critical Care Medicine*, 20(6), 840 -845.
- Pan, X., Han, C. S., Dauber, K., & Law, K. H. (2007). A multi-agent based framework for the simulation of human and social behaviors during emergency evacuations. *Ai & Society*, 22(2), 113 -132.
- Panzieri, S., Setola, R., & Ulivi, G. (2004). An agent based simulator for critical interdependent infrastructures. *Securing Critical Infrastructures, CRIS2004: Conference on Critical Infrastructures*, (pp. 25-27).
- Paté-Cornell, E. (2002). Finding and Fixing Systems Weakness: Probabilistic Methods and Applications of Engineering Risk Analysis. *Risk Analysis*, 22(2), 319-334.
- Pederson, P., Dudenhofer, D., Hartley, S., & Permann, M. (2006). *Critical infrastructure interdependency modeling: a survey of US and international research*. Idaho: Idaho National Laboratory.

- Permann, M. R. (2007). Genetic Algorithms for Agent-Based Infrastructure Interdependency Modeling and Analysis. *the 2007 spring simulation multiconference*. 2, pp. 169-177. Society for Computer Simulation International.
- Pouiller, R. (2014). *Tutoriel sur la réalisation d'application Web simple avec Spring*. Récupéré sur [www.developpez.com: http://rpouiller.developpez.com/tutoriels/spring/application-web-spring-hibernate/](http://rpouiller.developpez.com/tutoriels/spring/application-web-spring-hibernate/)
- Prezant, D., Clair, J., Belyaev, S., Alleyne, D., Banauch, G., Davitt, M., . . . Kalkut, G. (2005). Effects of the August 2003 blackout on the New York city healthcare delivery system: a lesson for disaster preparedness. *Critical care medicine*, 33(1), 96-101.
- Protection sociale. (2009). *sécurité des personnes hébergées dans des établissements médico-sociaux en cas de défaillance d'énergie*. Direction générale de l'action sociale.
- Purdy, G. (2010). ISO 31000:2009 – setting a new standard for risk management. *Risk Analysis*, 30, 881-886.
- Radio-Canada press. (2014, 09 09). *Alma Hospital : accomplished mission*. Retrieved 12 27, 2015, from Radio-Canada: <http://ici.radio-canada.ca/regions/saguenay-lac/2014/09/09/001-interruption-electrique-hopital-alma.shtml>
- Rinaldi, S. M., Peerenboom, J. P., & Kelly, T. K. (2001). Identifying, understanding, and analyzing critical infrastructure interdependencies. *IEEE Control Systems Magazine*, 11-25.
- Rinne, T., Tillander, K., & Gronberg, P. (2010 ). *Data collection and analysis of evacuation situations* . VTT Research notes .
- Rose, A., Oladosu, G., & Liao, S. Y. (2007). Business interruption impacts of a terrorist attack on the electric power system of Los Angeles: customer resilience to a total blackout. *Risk Analysis*, 27(3), 513-531.
- Rossetti, M. D. (2015). *Simulation modeling and Arena*. John Wiley & Sons.
- Schultz, C. H., Koenig, K. L., & Lewis, R. J. (2007 ). Decision making in hospital earthquake evacuation: Does distance from the epicenter matter? . *Annals of emergency medicine* , 320 -326.
- Shi, J., Ren, A., & Chen, C. (2009). Agent-based evacuation model of large public buildings under fire conditions. *Automation in construction*, 338 -347.
- Smith, J. L., & Brokaw, J. T. (2008). Agent based simulation of human movements during emergency evacuations of facilities. *Structures Congress*, (pp. 1 -10).
- Sokhansefat, G., Delavar, M., & Banedj-Schafii, M. (2012). Multi-Agent Simulation of Wayfinding for Rescue Operation during Building Fire . *World Academy of Science, Engineering and Technology* , (p. 1204 ) .
- Squillace, N. (2010). *Hospital Evacuations: Historical Precedence and Modern Preparedness*. Wright State University Boonshoft School of Medicine: Master of Public Health Program.
- Taaffe, K. M., Kohl, R., & Kimbler, D. L. (2005). Hospital evacuation: issues and complexities. *Winter Simulation conference* (p. 8). IEEE.
- Taaffe, K., Johnson, M., & Steinman, D. (2006). Improving hospital evacuation planning using simulation. *Winter Simulation Conference*, (pp. 509-515 ) .
- Tayfur, E., & Taaffe, K. (2009a). A model for allocating resources during hospital evacuations. *Computers and Industrial Engineering*, 57(4), 1313 -1323.
- Tayfur, E., & Taaffe, K. (2007 ). Allocation of resources for hospital evacuations via simulation . *Simulation conference* (pp. 1148 -1154 ) . IEEE.
- Tayfur, E., & Taaffe, K. (2009b). Simulating hospital evacuation—the influence of traffic and evacuation time windows. *Journal of Simulation*, 220 -234.
- Tolone, W. J., Wilson, D., Raja, A., Xiang, W. N., Hao, H., Phelps, S., & Johnson, E. W. (2004). Critical infrastructure integration modeling and simulation. *International*

- Conference on Intelligence and Security Informatics* (pp. 214-225). Berlin Heidelberg: Springer .
- U.S. Department of Homeland Security. (2010). *Supplemental tool: Executing a critical infrastructure risk management approach* . DHS Risk Lexicon.
- Vangerud, T. (2003). Emergency preparedness for an extended utility outage. *Disaster Management & Response*, 119-121.
- Vidal, J., Buhler, P. A., & Huhns, M. N. (2001). Inside an Agent. *IEEE Internet Computing*, 5(1), 82-86.
- Vugrin, E., Verzi, S., Finley, P., & Turnquist, M. (2015 ). Modeling Evacuation of a Hospital without Electric Power . *Prehospital and Disaster Medicine* , 279 -287.
- Wabo, N. C., Ortenwall, P., & Khorram-Manesh, A. (2012). Hospital evacuation; planning, assessment, performance and evaluation . *Journal of Acute Disease* , 58 -64.
- Wideman, J. (2004). infection control implications and lessons learned for Michigan hospitals. *American Journal of Infection Control*, 32(3), 90.
- Wildavsky, A. B. (1988). *Searching for Safety*. New Brunswick: The social philosophy and policy center, Transaction books.
- Yusta, J. M., Correa, G. J., & Lacal-Aránategui, R. (2011). Methodologies and applications for critical infrastructure protection: State-of-the-art. *Energy Policy*, 39(10), 6100-6119.

---

# Contributions scientifiques

## *Publications internationales*

1. Attia, S., Boubetra, A., & Saad Saoud, M. (2014). **Decision making issues related to critical infrastructures interdependencies management.** *Journal of Advances in Computer Networks*, 2(1).
2. Attia, S., Boubetra, A., & Saoud, M. S. (2016). **Development of an Emergency Response Management using Mobile Devices for Hospital Infrastructures Affected by Power Grid Failures.** *International Journal of Healthcare Information Systems and Informatics (IJHISI)*, 11(1), 36-57.

## *Conférences internationales*

1. Attia, S., Boubetra, A., Saad saoud, M. **Decision making issues related to critical infrastructures interdependencies management.** *4<sup>th</sup> International Conference on Software and Computing Technology (ICSCT 2013)*. October 24-25, 2013, Konya, Turkey.(Session orale)
2. Attia, S., Boubetra, A., Saad saoud, M. **Contribution of computer simulation to disaster management.** *1<sup>st</sup> International Conference on Information and Communication Technologies for Disaster Management (ICT-DM 2014)*. March 24-25, 2014, Algiers, Algeria. (Session Poster)
3. Attia, S., Boubetra, A., Saad saoud, M. Atia S., Titouni S. **A web mobile-based management support system for hospital infrastructures affected by power outages.** *7<sup>th</sup> International Conference on Sciences of Electronic, Technologies of Information and Telecommunications (SETIT 2016)*. December 18-20, 2016, Hammamet, Tunisia. (Session Poster)

# Annexe

## A.1 Présentation du cas d'étude : Hôpital Bouzidi Lakhdar de Bordj Bou Arréridj

L'hôpital Bouzidi Lakhdar est un établissement public de santé situé dans la ville de Bordj Bou Arréridj, à ce titre il a plusieurs missions :

- Diagnostic des maladies
- Traitement avec ou sans hospitalisation
- Prévention des états pathologiques
- Enseignement, pour les professions médicales et paramédicales.

### A.1.1 Capacité technique de l'hôpital

La structure du bâtiment de cet hôpital dispose de cinq étages avec une capacité technique de plus de 270 lits répartis sur seize services médicaux et chirurgicaux comme montrer dans le tableau (A.1.1). Chaque étage contient deux ou trois services de trois ou quatre chambres avec une capacité de quatre lits chacune.

**Tableau A.1.1.** Capacité technique de l'hôpital Bouzidi Lakhdar

Etage	Services	Nombre de lits
<b>Rez-de-chaussée</b>	Les urgences	14 lits
	La morgue	/
	Laboratoire des analyses	/
	Administration	/
	Injections de sang	/
<b>1<sup>er</sup> étage</b>	Hémodialyse	24 lits
	Chirurgie générale	48 lits
	Radiologie	/
	Réanimation	12 lits
<b>2<sup>ème</sup> étage</b>	ORL	16 lits
	Ophtalmologie	08 lits
	Orthopédie	13 lits
<b>3<sup>ème</sup> étage</b>	Chirurgie générale	48 lits
<b>4<sup>ème</sup> étage</b>	Médecine interne	20 lits
	Cardiologie	40 lits
<b>5<sup>ème</sup> étage</b>	Pneumologie	15 lits
	Infectiologie	15 lits

### A.1.2 Effectif de l'hôpital

L'hôpital Bouzidi Lakhdar de Bordj Bou Arréridj comporte un nombre conséquent de personnel médical et administratif. Comme montré dans le tableau (A.1.2), l'hôpital compte plus de **178 employés** (médecins spécialistes, médecins généralistes, paramédicaux, personnel administratif, technique et de service).

**Tableau A.1.2.** *Effectif de l'hôpital Bouzidi Lakhdar*

Services médicaux	Effectif personnel			
	Personnel médical		Personnel paramédical	Administratif technique et de service
	Spéc	Gén		
<b>Cardiologie</b>	4	2	9	2
<b>Infectiologie</b>	2	4	0	2
<b>Médecine interne</b>	2	4	20	3
<b>Néphrologie</b>	0	4	6	2
<b>Oncologie Médicale</b>	3	0	7	1
<b>Pneumo Phtisiologie</b>	1	4	7	2
<b>Anesthésie Réanimation</b>	1	7	13	3
<b>Total</b>	13	25	62	15
Services chirurgicaux	Effectif personnel			
	Personnel médical		Personnel paramédical	Administratif technique et de service
	Spéc	Gén		
<b>Chirurgie Générale</b>	9	0	10	3
<b>Ophthalmologie</b>	4	0	8	2
<b>ORL</b>	2	1	7	2
<b>Ortho Traumatologie</b>	3	0	10	2
<b>Total</b>	18	1	35	9
<b>Total général des deux services</b>	<b>31</b>	<b>26</b>	<b>97</b>	<b>24</b>

### A.2 Source d'alimentation alternative de l'hôpital

L'hôpital BOUZIDI Lakhdar dispose d'un seul groupe électrogène qui sert à fournir de l'électricité en cas de panne électrique pour alimenter surtout les services et les installations sensibles tel que le service de réanimation, des urgences chirurgicales, la morgue, le laboratoire.... Ce groupe est constitué d'un moteur thermique, sa vitesse de rotation égale à

800tr /min, fournissant une tension égale à 200v, de fréquence égale à 50Hz et de puissance égale à 500KVA. Ce groupe électrogène doit être maintenu toujours à une température de plus que 40°C par des résistances chauffantes électriques, afin que le groupe soit fonctionnel au moment de la coupure du réseau d'alimentation normale.

### **A.3 Questionnaire dédié pour les intervenants**

Pour bien comprendre le mécanisme d'évacuation des patients hospitalisés en cas d'une panne électrique, nous avons posé les questions suivantes au différent personnel de l'hôpital Bouzidi Lakhdar, chacun en fonction de sa responsabilité:

- Qui a la responsabilité de décider d'évacuer l'hôpital ?
- Quels sont les problèmes que les administrateurs considèrent et trouvent lorsqu'ils décident d'évacuer l'hôpital?
- Quelles sont les ressources humaines et matérielles nécessaires pour l'évacuation de chaque type de patient ?
- Quelles sont les informations nécessaires pour évacuer un patient vers un autre hôpital ?
- Quelles sont les problèmes fréquents d'évacuation apparaissant en cas d'une panne électrique?
- Quelles sont les services alimentés par les groupes électrogènes en cas d'une panne électrique ?
- Avez-vous dans cet établissement de santé un plan d'évacuation déterminé au préalable en cas d'une panne électrique ?
- Quelles sont les moyens de communication souvent utilisés au sein de votre établissement de santé pour informer les intervenants concernant la survenue d'un risque nécessitant l'évacuation des patients ?
- Quelles sont les étapes d'un processus d'évacuation déclenché en cas de catastrophe ?
- Quelles sont les problèmes qui ralentissent le progrès et le démarrage du processus d'évacuation en cas d'une panne électrique ?

#### A.4 Fiche d'évacuation de malades entre établissements de santé

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE LA SANTE, DE LA POPULATION ET DE LA REFORME  
HOSPITALIERE

#### FICHE D'EVACUATION DE MALADE ENTRE ETABLISSEMENTS DE SANTE

##### Identification de l'établissement évacuateur (nom et adresse exacte) :

- Public : .....
- Parapublic : .....
- Privé : .....

Date : ..... Heure de départ de l'évacuation : .....

Identification du service d'évacuateur : .....

##### Renseignements sur le malade :

- Nom : .....
- Prénom : .....
- Date et lieu de naissance : .....
- Adresse : .....
- Wilaya : .....
- Autres : .....

##### Renseignements cliniques :

.....  
.....  
.....

##### Prestations dispensées :

.....  
.....

Motif d'évacuation : .....

Identification de l'établissement d'accueil : .....

Moyens d'évacuation : Ambulance – Ambulance médicalisée – Autres moyens : .....

Identification de ou des accompagnateurs et signature : .....

Signature : .....

Le médecin

Le directeur de l'établissement

Le surveillant

Le directeur de garde

## A.5. Fiche de convention de stage effectuée au niveau de l'hôpital :

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur  
et de la Recherche Scientifique  
Université de Bordj Bou Arréridj  
Faculté des Mathématiques de l'Informatique

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

جامعة برج بوعريريج  
كلية الرياضيات و الإعلام الآلي

Réf :134/MI/2014

Date : 16/04/2014

### Convention de Stage

Entre la faculté des Mathématiques et d'Informatique, Université de Bordj Bou Arréridj  
Représentée par Monsieur **AKROUF Samir**, Doyen de la faculté.

Ci- après désigné « la faculté » d'une part.

Et l'entreprise : **L'hôpital LAKHDAR BOUZIDI Bordj Bou Arréridj**

Ayant son siège à : **Rue 17 octobre Bordj Bou Arréridj**

Représentée par : Madame/Monsieur : .....

Ci-après désignée « Entreprise » d'autre  
part.

IL A ETE CONVENU CE QUI SUIIT :

**Article 01** : La présente convention a pour objet l'organisation du stage pratique de l'étudiante :  
- **ATTIA SAFA**

**Article 02** : Le stage a pour but d'assurer l'application pratique de l'enseignement donné à la faculté, conformément aux programmes et plans d'études de la spécialité de l'étudiante.

**Article 03** : Le programme de stage pratique établi par la faculté, et contrôlé conjointement dans son exécution par la faculté et l'Entreprise, est joint à la présente convention dont il fait partie intégrale.

**Article 04** : Le stage pratique se déroule du **11/05/2014 au 11/06/2014**.

### **Article 05 : Objet et finalité**

Le stage a pour objet l'acquisition de connaissances et leur mise en œuvre dans un cadre professionnel. Il s'inscrit strictement dans le cadre de la formation pédagogique de l'étudiante et ne peut en aucun cas être assimilé à un emploi de quelque nature qu'il soit.

### **Article 06 : Sujet du stage, activités prévues**

Le sujet du stage est le suivant :

Ce stage vise à définir les problèmes liés à la possibilité d'avoir une panne électrique au sein de l'hôpital ce qui nécessite l'évacuation des patients concernées et de collecter l'ensemble des données indispensables pour la réalisation de notre travail.

Ce sujet ne peut être modifié qu'en accord avec les responsables du stage au sein de l'organisme d'accueil.

Activités prévues :

- Collecte des données nécessaires pour la réalisation du travail.
- Faire des interviews avec le personnel de l'hôpital pour avoir plus d'informations sur le problème posé.
- Tester l'application développée par le personnel en prenant leurs remarques et critiques en considération.

Le programme du stage est établi par le responsable du stage au sein de l'organisme d'accueil en accord avec le responsable de stage de l'étudiante au sein de la faculté.

### **Article 07 : Discipline et confidentialité**

L'étudiante est soumise aux dispositions du règlement intérieur de l'organisme d'accueil relatif à l'hygiène, à la sécurité et à la discipline générale (modalité d'accès au site de stage, utilisation du matériel et des moyens de communication, confidentialité)

Concernant la confidentialité, l'étudiante s'engage n'utiliser aucune des informations recueillies par elle au sein de l'organisme d'accueil sans accord préalable de l'organisme d'accueil.

ظهور عدد كبير من نقاط الضعف وزيادة الترابط بين الأنشطة الاقتصادية والاجتماعية وضعت الشبكات الحيوية في وضع دقيق للغاية. هذه الشبكات تمثل البنى التحتية الحساسة حيث أن سلامة وأمن كل واحدة منهن يعتمد على الاخرى. كلما كانت هذه البنى أكثر ترابطاً، كلما أدى فشل أو تعطل إحداها إلى عواقب كارثية على جميع البنى المرتبطة بها. من أجل تسيير وحماية هذه البنى التحتية المترابطة والتقليل من هشاشتها، عديد المشاريع والدراسات العلمية تم القيام بها وإنجازها.

يهدف بحثنا العلمي هذا أساساً إلى دراسة المشكلة من وقوع انقطاع للكهرباء في البنى التحتية للمستشفيات وتقديم حلول استباقية على شكل قرارات تتخذ وتقدم إلى الجهات المعنية في الإدارة والتدخل في مثل هذه الحالات الحرجة. لهذا، اقترحنا نظام مساعد لإدارة الطوارئ الذي تمت نمذجته من خلال خلق سيناريوهات محاكاة توجيهية وقابلة للتكيف. ونفذنا هذا النظام من خلال إنشاء تطبيق ويب يعمل على الأجهزة المحمولة. هذا الأخير، يسمح من خلال الفوائد التي يمكن أن يقدمها، من تسهيل مهام المصالح المعنية، وتحسين نوعية الاتصالات للتقليل من الوقت اللازم للإخلاء، وبالتالي الحد من نطاق الضرر الحاصل.

**الكلمات المفتاحية** حماية البنى التحتية، مشكل الترابط، تعطل الشبكة الكهربائية، البنية الاستشفائية، نظام داعم للتسيير، سيناريوهات توجيهية، المحاكاة، تطبيق إلكتروني محمول.

## Abstract

The emergence of a large number of vulnerabilities and the growing interdependence of economic and social activities put vital networks in a particularly delicate situation. These networks constitute the critical infrastructures of which the safety and the security of one of them depends on the others. Being more and more interdependent, their failure can have catastrophic consequences on the whole. In order to manage and protect these infrastructures and reduce their vulnerabilities, several works to protect them have developed. The main objective of our research aims to study the problem of the occurrence of an electrical failure in the hospital infrastructures and to provide anticipatory solutions as decisions to be taken and submitted to the stakeholders involved in the management and intervention in such critical situations. To this end, a system to assist emergency management was first proposed and modeled by the creation of prescriptive and adaptive simulation scenarios. This system was then realized via a web-mobile application. The latter, thanks to the advantages that offers, facilitates the tasks of the stakeholders, improves the quality of the communications, reduces the time required for evacuation and, therefore, limits the scope of the damage.

**Keywords** Critical infrastructure security, interdependency problem, power grid failure, hospital infrastructure, management support system, prescriptive scenarios, simulation, web-mobile application.

## Résumé

L'apparition d'un grand nombre de vulnérabilités et l'interdépendance croissante des activités économiques et sociales ont placés les réseaux vitaux dans une situation notamment délicate. Ces réseaux constituent les infrastructures critiques dont la sûreté et la sécurité de chacune d'entre elles dépend des autres. Etant de plus en plus interdépendantes, leur mise en défaut peut avoir des conséquences catastrophiques sur l'ensemble. Afin de gérer et sécuriser ces infrastructures et diminuer leurs vulnérabilités, plusieurs travaux visant à les protéger se sont développés. Les travaux de cette thèse visent à étudier la problématique de la survenue d'une défaillance électrique au sein des infrastructures hospitalières et à fournir des solutions anticipatives sous forme de décisions à prendre et à soumettre aux parties prenantes concernées par la gestion et l'intervention dans telles situations critiques. Pour cela, un système d'aide à la gestion des interventions d'urgence a été d'abord proposé et modélisé par la création de scénarios prescriptifs et adaptatifs de simulation. Ce système a été ensuite réalisé via une application web-mobile. Cette dernière, a permis grâce aux avantages qu'elle peut offrir, de faciliter les tâches des intervenants, d'améliorer la qualité des communications, de réduire le temps nécessaire pour l'évacuation et par conséquent de limiter la portée des dégâts.

**Mots clés** Sécurité des infrastructures critiques, problème d'interdépendance, défaillance du réseau électrique, infrastructure hospitalière, système d'aide à la gestion, scénarios prescriptifs, simulation, application web-mobile.