



MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR  
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITÉ ABBES LAGHROUR DE KHENCHELA  
FACULTÉ DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE



Département Mathématique et Informatique

## Mémoire de fin d'études

*Pour l'obtention du diplôme de Master (L.M.D)*

**Spécialité: Informatique**

*Par :*

***KHELLAF Romaiïssa***

**Option: Sécurité et Technologie Web**

***Vérification comportementale des  
systèmes de l'internet des objets par  
les réseaux de Pétri : Etude de cas  
système intelligent eau potable***

***Soutenu le :25 /06 /2023***

***.Dr. SIAM Abderahim ( président )***

***.Dr. MAAROUK Toufik (examineur )***

***.Dr.BEN HARKOU ghania (Représentant de l'incubateur)***

***M. SID Illyés (partenaire économique)***

***.Dr. MESSAOUDI Nabil (encadreur )***

***.Dr. SAIDI Abdelkader (co encadreur)***

***Année universitaire : 2023/2024***

# Remerciements

Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde gratitude envers toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de ce mémoire. Le chemin parcouru n'aurait pas été possible sans leur soutien, leur expertise et leur encouragement constants.

Je tiens à remercier sincèrement mon directeur de mémoire, Dr.Nabil MESSAOUDI , pour sa guidance, son expertise et sa disponibilité tout au long de ce projet. Ses conseils éclairés et sa passion pour le sujet ont été d'une grande valeur et m'ont aidé à approfondir mes connaissances et à développer mes compétences de recherche.

Je voudrais aussi témoigner ma profonde reconnaissance à Dr. Abdelkader SAIDI, pour votre précieuse contribution en tant que co-encadrant dans la réalisation de ce projet. Votre expertise, votre soutien et vos conseils tout au long de ce processus ont été inestimables..

Je suis également reconnaissant envers mes collègues et mes amies proches , « Abada Manal » qui ont été une source constante de soutien et d'encouragement tout au long de cette aventure. Leurs idées partagées, leurs discussions stimulantes et leur soutien moral ont été d'une importance inestimable.

Je voudrais exprimer ma gratitude envers ma famille et mes soeurs "Sara", "Besma", "Loubna", "Nihed" pour leur soutien inconditionnel et leur amour tout au long de ce parcours académique. Leur présence et leurs encouragements ont été une source de motivation constante.

Enfin, je tiens à remercier l'institution académique qui m'a donné l'opportunité de mener cette recherche et de poursuivre mes études. Leur engagement en faveur de l'excellence académique a créé un environnement propice à l'apprentissage et à la croissance personnelle..

# Résumé

À travers ce thème nous essaierons d'utiliser les réseaux de Pétri dans une spécification UML pour une vérification Comportementale des systèmes de l'internet des objets. Dans ce cas, le résultat permet à la dynamique du réseau de Pétri d'évaluer la présence d'impasses (Dead ends), de pics suspendus (hanging peaks), de cycles sans fin (Endless cycles), de propriétés de sécurité et de vivacité (Safety and Liveness), et, si nécessaire, de reconcevoir la spécification. L'utilisation intégrée combinée de la vérification automatique et fonctionnelle d'une spécification d'un système à base d'UML et les modèles projetés des réseaux de Pétri permet de réduire le temps de conception des systèmes de l'Internet des objets en éliminant en temps opportun les erreurs de spécification et de conception.

Mots clés : IoT, UML, vérification Comportementale, Pétri Nets

# Abstract

In this theme, we will try to use Petri nets in a UML specification for Behavioral Verification of Internet of Things systems. In this case, the result allows the dynamics of the Petri net to assess the presence of dead ends, hanging peaks, endless cycles, safety and liveness properties, and, if necessary, to redesign the specification. The combined integrated use of automatic and of a UML-based system specification and projected Petri net models reduces the design time of Internet of Things (IoT) systems by eliminating specification and design errors in good time.

key words : IoT, UML, Behavioral Verification, Petri Nets

# Table de matières

<b>1</b>	<b>L'internet des objets (IoT)</b>	<b>2</b>
1.1	Introduction	3
1.2	Définition de l'internet des objets :	3
1.2.1	Définition 1 :	3
1.2.2	Définition 2 :	3
1.2.3	Définition 3 :	3
1.2.4	Définition 4 :	3
1.3	Les caractéristiques de l'internet des objets :	4
1.3.1	L'intelligence artificielle :	4
1.3.2	L'interconnectivité :	4
1.3.3	Hétérogénéité :	4
1.3.4	Évolutivité	4
1.3.5	la sécurité :	5
1.4	les domaines d'application de l'internet des objets :	5
1.4.1	Domaine de transports :	6
1.4.2	Domaine de la santé	6
1.4.3	Domaine des Maisons/bâtiments intelligents :	6
1.4.4	Domaine d'agriculture et sélection	7
1.5	Les technologies de communication de l'IoT	7
1.5.1	Identification par radiofréquence (RFID)	7
1.5.2	Communication en champ proche (NFC)	8
1.5.3	Communication entre machines (M2M)	8
1.6	Architecture de l'IoT	9
1.7	Représentations UML des systèmes IoT	10
1.7.1	Diagrammes d'interaction :	10
1.7.2	Diagrammes physiques :	11
1.8	Conclusion :	11
<b>2</b>	<b>Les réseaux de pétri</b>	<b>12</b>
2.1	Introduction	13
2.2	Définition de réseaux de pétri :	13
2.3	Concepts de base des réseaux de pétri :	13
2.4	Les caractéristiques des systèmes de réseaux de pétri :	14
2.4.1	Exécution séquentielle :	14
2.4.2	Conflit :	15
2.4.3	La concurrence :	15
2.4.4	La synchronisation :	15
2.4.5	L'exclusion mutuelle :	16
2.5	Les propriétés de réseau de pétri :	16
2.5.1	L'accessibilité :	17
2.5.2	Délimitation et sécurité :	17
2.5.3	Le marquage de terminaison :	17

2.5.4	Le blocage : . . . . .	17
2.5.5	Le mort : . . . . .	17
2.5.6	La vivacité : . . . . .	17
2.6	Extension de réseau de pétri : . . . . .	18
2.6.1	Définition des réseaux de pétri colorés (CPN) : . . . . .	18
2.6.2	Analyse de CPN . . . . .	18
2.7	Conclusion . . . . .	19
<b>3</b>	<b>La vérification des systèmes de l'internet des objets</b>	<b>20</b>
3.1	Introduction . . . . .	21
3.2	La vérification formelle des applications de l'IoT : . . . . .	21
3.3	CPN Tools : . . . . .	21
3.3.1	Edition des réseaux CP : . . . . .	21
3.3.2	Outils pour l'édition des réseaux CP : . . . . .	22
3.4	Analyse des réseaux CP : . . . . .	22
3.4.1	Les outils de vérification : . . . . .	22
3.5	Les travaux connexes : . . . . .	23
3.6	Conclusion : . . . . .	25
<b>4</b>	<b>Etude de cas</b>	<b>26</b>
4.1	Introduction : . . . . .	26
4.2	Modélisation de système : . . . . .	26
4.3	Diagramme de cas d'utilisation : . . . . .	26
4.4	Diagramme de séquence . . . . .	27
4.5	Diagramme d'activité : . . . . .	27
4.6	Vérification comportementale de système : . . . . .	28
4.6.1	Règles de correspondance entre le diagramme d'activité UML et les PN/CPN	28
4.6.2	La vérification de la propriété de la fiabilité d'un système . . . . .	29
4.6.3	les couleurs utilisés dans ce modèle . . . . .	30
4.7	l'utilisation d'intelligence artificielle dans le système : . . . . .	31
4.8	Conclusion . . . . .	32
4.9	Conclusion générale . . . . .	32
<b>A</b>	<b>Description des cas d'utilisation</b>	<b>I</b>

---

# Table des figures

1.1	les domaines d'application de l'IoT [12] . . . . .	6
1.2	Architecture M2M [13] . . . . .	9
1.3	Cadre architectural d'un système IoT [14] . . . . .	10
2.1	Exemple de réseau de pétri [16] . . . . .	14
2.2	Déclenchement séquentiel des transitions [17] . . . . .	14
2.3	Conflit [17] . . . . .	15
2.4	Concurrence [17] . . . . .	15
2.5	Synchronisation [17] . . . . .	16
2.6	Processus mutuellement exclusifs [17] . . . . .	16
4.1	Diagramme de cas d'utilisation de système . . . . .	27
4.2	Diagramme de séquence de système . . . . .	27
4.3	Diagramme d'activité de système . . . . .	28
4.4	Mappage des règles du diagramme d'activité UML au CPN [21] . . . . .	29
4.5	le modèle de système . . . . .	30
4.6	Ensembles de couleurs du modèle de scénario du système . . . . .	31

# Liste des tableaux

4.1	Les places de la figure . . . . .	31
A.1	Détecter les données . . . . .	I
A.2	Surveillance à distance des capteurs . . . . .	II
A.3	Stockage et traitement des données . . . . .	II
A.4	Sécurité . . . . .	III
A.5	Inscription . . . . .	III
A.6	Connection . . . . .	IV
A.7	Payement . . . . .	V
A.8	Envoyer les données à l'hôpital . . . . .	VI
A.9	Alerte les clients . . . . .	VII
A.10	Envoyer le dataset à la direction des eaux . . . . .	VII

# Introduction générale

Le développement rapide de gadgets en réseau connus sous le nom d'Internet des objets ("IoT") a permis aux mondes physique et numérique d'interagir et de communiquer les uns avec les autres de manière invisible. Dans divers secteurs, notamment les soins de santé, les transports, l'agriculture et les villes intelligentes, cette révolution technologique a créé des avantages et des opportunités inédits. La complexité et la taille des systèmes IoT posent toutefois des difficultés considérables pour garantir leur fonctionnement précis et fiable. Afin de s'assurer que les systèmes IoT fonctionnent correctement et respectent les spécifications prévues, la vérification du comportement est essentielle. Elle implique l'analyse et la vérification du comportement du système par rapport à des caractéristiques souhaitables telles que la synchronisation, la vivacité, l'évitement des blocages et la sécurité. L'utilisation des réseaux de Pétri est une méthode efficace pour modéliser et étudier le comportement des systèmes. Les réseaux de pétri constituent un formalisme graphique permettant de vérifier des systèmes concurrents et leurs interactions. Ils sont constitués de places, de transitions, de jetons et d'arcs qui représentent les états, les actions, les données et les dépendances d'un système. En tenant compte des connexions entre les appareils, des flux de données et des protocoles de communication, les réseaux de pétri fournissent un cadre flexible pour capturer le comportement dynamique des systèmes IoT. L'objectif de ce thème est de développer une approche complète pour la vérification comportementale des systèmes IoT en utilisant les réseaux de pétri colorés. Il est essentiel de vérifier leur bon fonctionnement. La vérification consiste à s'assurer que les systèmes respectent les exigences spécifiées, fonctionnent correctement. Nous proposons une modélisation du système à l'aide de UML et une vérification du comportement du système à l'aide de l'outil CPN Tools.

Ce mémoire est organisée comme suit :

- **Chapitre 1** : définit le concept de l'IoT, présente les technologies qui motivent l'émergence de l'IoT et introduit les domaines d'applications et présente l'architecture et les caractéristiques de l'IoT.
- **Chapitre 2** : définit le concept de réseaux de pétri, et présente les caractéristiques des systèmes de réseaux de pétri et leur propriétés.
- **Chapitre 3** : Définit la vérification formelle et présenter les travaux connexes .
- **Chapitre 4** : présente une étude de cas sur un système intelligent eau potable

Chapitre **1**

# L'internet des objets (IoT)

## 1.1 Introduction

Le concept de l'internet des objets (IoT) a attiré l'attention ces dernières années en raison de son potentiel à apporter de nombreux avantages à l'homme. Le terme a été introduit pour la première fois par Kevin Ashton en 1999 et vise à connecter tout ce qui existe, à tout moment et en tout lieu. Les dispositifs IoT sont dotés de capacités de détection, de traitement et d'actionnement qui leur permettent de collaborer entre eux pour fournir des services intelligents et innovants. L'IoT a un large éventail d'applications, notamment la domotique, la surveillance de l'environnement et les soins de santé, entre autres. L'objectif ultime de l' est de réunir divers domaines d'application sous le nom de "vie intelligente". L'architecture de l'IoT prend en charge des dispositifs hétérogènes et diverses méthodes de communication qui permettent aux dispositifs IoT de se connecter et d'offrir des services aux utilisateurs finaux. Ce chapitre présente une vue d'ensemble des concepts clés liés à l'internet des objets (IoT). Il couvre la définition de l'IoT, les applications potentielles, ainsi que l'architecture et les technologies utilisées dans les systèmes IoT.

## 1.2 Définition de l'internet des objets :

Bien que l'internet des objets ait attiré l'attention du monde entier, il n'existe pas de définition largement acceptée de ce terme. Divers groupes utilisent des définitions différentes pour décrire ou défendre une compréhension particulière de ce qu'est l'IoT et de ses caractéristiques les plus significatives. Prenons par exemple les définitions suivantes :

### 1.2.1 Définition 1 :

Publiée en 2012, la recommandation Y.2060 de l'Union internationale des télécommunications (UIT) définit le concept de l'internet des objets comme : « Une infrastructure mondiale pour la société de l'information qui permet d'améliorer les services en connectant des objets (physiques et virtuels) à l'aide de technologies de l'information et de la communication interopérables qui sont déjà utilisées et en constante évolution ». [1]

### 1.2.2 Définition 2 :

« Le réseau d'objets physiques, ou "choses", équipés de capteurs, de logiciels et d'autres technologies dans le but de communiquer et d'échanger des données avec d'autres appareils et systèmes par l'intermédiaire d'internet est appelé l'internet des objets (IoT) ». [2]

### 1.2.3 Définition 3 :

Une autre définition provient du Cluster of European Research projects on the Internet of Things (CERPIoT), qui a proposé sa vision de l'IoT en 2009. L'IoT est considéré comme « une infrastructure de réseau mondiale, flexible et auto-configurable, dans laquelle les objets physiques et "virtuels" sont incorporés sans effort dans le réseau d'information et possèdent des identités, des caractéristiques physiques et des personnalités virtuelles basées sur des protocoles de communication ouverts et normalisés ». [3]

### 1.2.4 Définition 4 :

Gubbi et al définit : « L'internet des objets (IoT) est l'interconnexion de dispositifs de détection et d'actionnement qui permet de partager des informations entre plates-formes par le biais d'un cadre unifié et crée une image d'exploitation commune pour permettre des applications créatives ». [4]

## 1.3 Les caractéristiques de l'internet des objets :

L'internet des objets présente de nombreuses caractéristiques. Dans cette section, nous décrivons les principales caractéristiques de base qui sont essentielles :

### 1.3.1 L'intelligence artificielle :

Dans l'IoT, nous ne disposons pas seulement de dispositifs physiques, mais nous avons aussi la capacité de créer des dispositifs virtuels et d'améliorer leur intelligence pour qu'ils se comportent de manière intelligente. Cela signifie que nous pouvons créer des versions virtuelles de n'importe quel objet intelligent et améliorer différents aspects de son intelligence, tels que la collecte, le traitement et l'enregistrement des données, et les intégrer dans des dispositifs qui n'existent pas à l'état naturel . Les appareils compatibles avec l'IoT peuvent être dotés de fonctions intelligentes, comme les thermostats d'apprentissage Nest, qui sont équipés d'une connectivité Wi-Fi, de capteurs et de capacités d'auto-apprentissage. De même, le Misfit Shine est un tracker de fitness qui peut surveiller le sommeil et partager les tâches informatiques avec un smartphone et le cloud. [5]

### 1.3.2 L'interconnectivité :

L'IoT permet de connecter pratiquement n'importe quel appareil ou objet à l'infrastructure mondiale d'information et de communication . L'IoT simplifie le processus d'établissement de connexions entre les appareils, ce qui leur permet de communiquer et d'interagir plus facilement les uns avec les autres. [6]

### 1.3.3 Hétérogénéité :

Les appareils IoT sont hétérogènes car ils fonctionnent sur différentes plateformes matérielles et réseaux, ce qui leur permet de communiquer avec d'autres appareils et réseaux . L'hétérogénéité de l'IoT est à la fois une caractéristique unique et une faiblesse de la technologie. L'architecture de l'IoT peut consister en plusieurs niveaux d'appareils, chacun étant axé sur l'exécution de fonctions spécifiques en fonction de son niveau de complexité. Cette diversité découle des variations de complexité des appareils, qui ont une incidence sur leur utilisation des ressources informatiques et sur la quantité de données transférées. L'hétérogénéité de l'IoT se traduit par un large éventail de composants matériels, tels que des capteurs, des concentrateurs, des routeurs, des commutateurs, des bases de données et des serveurs informatiques, entre autres. Pour éviter de surcharger le système, chaque appareil IoT se voit attribuer un rôle spécifique et n'effectue que les opérations nécessaires . [7]

### 1.3.4 Évolutivité

Une installation IoT typique comprend de nombreux capteurs et appareils, et la capacité du système dépend de divers facteurs tels que le nombre de canaux d'entrée et de sortie, la charge maximale qu'il peut supporter sur l'internet ou le réseau électrique, et d'autres facteurs similaires. Ces considérations déterminent en fin de compte le nombre de composants pouvant être intégrés dans un système unique. L'utilisation de technologies tierces telles que les commutateurs et les routeurs peut prévenir toute difficulté pouvant survenir lors de l'échange de données entre un grand nombre d'appareils IoT. Ces dispositifs facilitent la communication et peuvent contribuer à rationaliser l'échange de données en fournissant des méthodes efficaces et sécurisées de transfert de données. Les commutateurs sont utilisés pour interconnecter les appareils sur le même réseau, ce qui leur permet de communiquer entre eux facilement et rapidement. Grâce aux commutateurs, les données peuvent être dirigées vers la destination voulue à l'aide des adresses MAC, ce qui permet de réduire la congestion du réseau et d'améliorer les performances. Les routeurs, quant à eux, sont utilisés pour connecter différents réseaux entre eux et faciliter le transfert de données. Ils utilisent les adresses IP pour diriger les données entre les réseaux et offrent des fonctions de sécurité supplémentaires telles que des pare-feu et des réseaux privés virtuels (VPN) pour améliorer la sécurité du réseau. L'informatique en nuage est une technologie

largement utilisée qui simplifie la gestion de l'infrastructure et permet une analyse efficace des données. Cependant, l'envoi de toutes les données générées vers une seule ressource en nuage peut s'avérer inefficace et entraîner des problèmes au niveau du système. Pour les applications qui dépendent d'une faible latence, telles que la surveillance de la santé et les interventions d'urgence, le délai qui se produit lors du transfert des données vers le nuage et inversement peut être inacceptable. Dans de tels cas, une technologie plus adaptable telle que l'informatique en nuage est nécessaire. L'informatique en nuage est une technologie qui combine des éléments de traitement des données, des applications analytiques et des dispositifs de réseau pour parvenir à un équilibre dans l'allocation des ressources. Cette approche rapproche le traitement des données de leur source, réduisant ainsi le temps de latence qui résulte de l'envoi des données à une ressource en nuage distante. Il est improbable que tous les appareils IoT utilisent les mêmes protocoles de transmission de données, ce qui nécessiterait des opérations supplémentaires d'unification des données par un système de gestion central. Cela peut augmenter la charge de travail du système, en particulier lorsqu'il y a beaucoup d'appareils connectés, ce qui finit par avoir un impact sur la qualité du service. Lorsqu'il s'agit de quelques appareils reliés entre eux, le système peut sembler fonctionner normalement, mais au fur et à mesure que d'autres appareils sont ajoutés, la qualité du service diminue inévitablement. Pour minimiser la latence du réseau, les propriétaires de réseaux de systèmes doivent organiser les demandes de séquences de gestion des données et les ajuster soigneusement en fonction de la topologie de leur réseau IoT. Des pratiques adéquates de gestion des données peuvent contribuer à réduire la latence du réseau et à garantir un échange de données efficace entre les appareils. Il peut s'agir de normaliser les formats de données, d'optimiser les protocoles de réseau et d'utiliser des techniques de mise en cache et de compression des données. Ce faisant, les propriétaires de réseaux de systèmes peuvent améliorer la qualité du service et réduire la charge de travail de leur système de gestion central. Pour gérer efficacement un système IoT, il est important de disposer d'appareils capables d'effectuer des opérations, des tâches et des conversions de données de base hors ligne, sans dépendre d'unités d'informatique en nuage ou d'autres ressources du système. Cela peut améliorer considérablement la vitesse et l'efficacité du processus informatique. [8]

### **1.3.5 la sécurité :**

Si nous profitons des avantages de l'IoT, la sécurité ne doit pas être négligée. En tant que producteurs et utilisateurs de l'IoT, nous devons donner la priorité à la sécurité dans notre approche de la conception. Cela comprend non seulement la sécurité physique des points d'extrémité, mais aussi la sécurité des données et des réseaux. Il est essentiel de développer un paradigme de sécurité capable de s'adapter pour garantir la sécurité des terminaux physiques, des réseaux et des données qui y sont transmises. Il faut pour cela adopter une approche proactive de la sécurité, comprenant des évaluations régulières des vulnérabilités, des mises à jour de sécurité et la mise en œuvre des meilleures pratiques en matière de sécurité. En outre, il est essentiel de donner la priorité à la confidentialité des données et de mettre en œuvre des mesures solides de protection des données, y compris des mécanismes de cryptage et de contrôle d'accès, afin de protéger les informations sensibles contre un accès non autorisé ou un vol. Les dispositifs IoT connectés peuvent améliorer la sécurité personnelle, comme dans le cas d'un véhicule en mouvement dont les pneus peuvent communiquer leur état actuel au conducteur par l'intermédiaire d'un tableau de bord intelligent. Cela peut contribuer à réduire le risque d'accidents causés par l'éclatement des pneus en raison d'une surchauffe ou d'autres problèmes. Dans l'ensemble, la technologie IoT peut offrir des fonctions de sécurité améliorées pour diverses applications. [9]

## **1.4 les domaines d'application de l'internet des objets :**

L'IoT a le potentiel d'avoir un impact positif sur la société, l'environnement et l'économie en permettant l'adaptabilité. Diverses applications basées sur l'IoT, telles que la mobilité, les maisons et bâtiments intelligents, la sécurité publique, la médecine et les soins de santé, l'agriculture et la vie autonome, peuvent nous être bénéfiques de différentes manières. La dépendance à l'égard de ces applications s'est considérablement accrue et elles sont devenues essentielles pour nous. L'importance de l'IoT atteint un niveau visionnaire et cruciale pour l'avenir de l'internet. L'idée

et la vision de l'IoT peuvent nous emmener vers l'avenir.

### 1.4.1 Domaine de transports :

L'ajout d'un plus grand nombre de capteurs, d'actionneurs et de puissance de calcul dans les véhicules, ainsi que dans les intersections routières, a conduit à la collecte de données précieuses qui peuvent être utilisées pour améliorer le contrôle et le guidage du trafic, aider à la gestion des dépôts et fournir aux touristes des informations pertinentes sur les transports. Le Traffic Information Grid (TIG) construit sur ShanghaiGrid est un exemple réussi d'utilisation de la technologie IoT dans l'industrie des transports. La grille d'information sur le trafic (TIG) permet de surmonter les difficultés liées à la collecte, au stockage, à l'agrégation et à l'analyse des données sur le trafic en utilisant la technologie de la grille. Le TIG intègre les données de trafic collectées par des capteurs et des actionneurs, facilite le partage des données et des ressources et améliore les services de trafic pour les participants en s'attaquant aux goulets d'étranglement et aux problèmes de trafic. Le portail TIG est accessible via différents dispositifs, notamment des navigateurs web, des téléphones mobiles et des infrastructures publiques, et offre aux utilisateurs une gamme de services d'information, tels que des informations sur l'état des routes, la sélection de schémas de déplacement à moindre coût et à moindre temps, l'utilisation de cartes et la recherche d'informations. [10]

### 1.4.2 Domaine de la santé

Le secteur des soins de santé peut tirer un grand profit des technologies IoT telles que la RFID et le WSN. Ces innovations, notamment les dispositifs médicaux portables et les étiquettes RFID sur les vêtements, peuvent fournir des informations précieuses sur l'état de santé d'une personne. Il existe quatre grandes catégories d'applications de l'IoT dans les hôpitaux : la collecte automatique de données et la détection, l'identification et l'authentification des personnes, et les soins de santé à distance. Les médecins ont la possibilité d'analyser les données recueillies auprès des patients afin de déterminer si leur état se situe dans une fourchette normale. En outre, les données peuvent être transmises d'une station de base domestique au smartphone du médecin par le biais de messages courts GSM. Cette approche pourrait permettre d'améliorer les services de soins à distance pour les patients hospitalisés ou recevant des soins à domicile. [11]

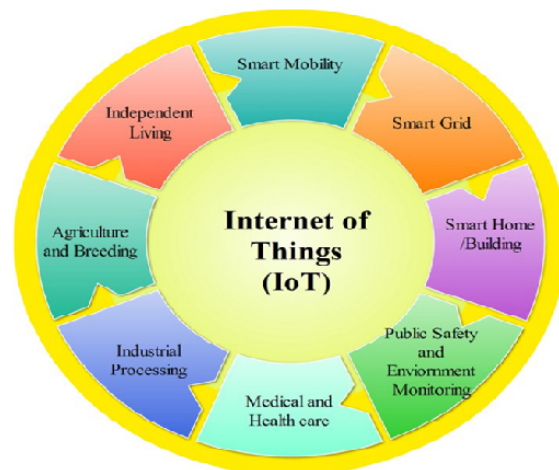


FIGURE 1.1 – les domaines d'application de l'IoT[12]

### 1.4.3 Domaine des Maisons/bâtiments intelligents :

Notre environnement est rempli d'appareils électroniques tels que les climatiseurs, les chauffages, les congélateurs, les ventilateurs, les micro-ondes et les lumières. Ces appareils peuvent être améliorés par l'ajout de capteurs et d'actionneurs afin d'optimiser la consommation d'énergie et d'améliorer le confort de l'utilisateur. Grâce à ces capteurs, ces appareils peuvent détecter

la température extérieure et la présence de personnes dans une pièce. Ils peuvent ainsi réguler le chauffage, le refroidissement, l'éclairage et d'autres fonctions en fonction des besoins, ce qui permet de réaliser des économies et d'améliorer l'efficacité énergétique. Une ville intelligente disposera d'une multitude de capteurs et de dispositifs intelligents installés dans les maisons et les bâtiments, y compris, mais sans s'y limiter, des passerelles à large bande, des téléphones mobiles, des ordinateurs portables, des PC, des téléviseurs, des haut-parleurs, des appareils électroménagers, des prises, des caméras de surveillance, des lumières, des stores, des thermostats et des compteurs. Ces appareils seront interconnectés par le biais de technologies de communication afin de permettre une intégration et un fonctionnement sans faille. Les maisons et bâtiments intelligents équipés d'une variété de capteurs et d'appareils intelligents offrent de nombreuses applications. L'une des applications les plus attrayantes est la domotique, qui permet de contrôler à distance divers appareils à l'aide d'applications en ligne. Les applications de sécurité telles que la vidéosurveillance, la détection des intrusions et la gestion des accès, ainsi que les applications de gestion et de maintenance des installations telles que la détection des pannes, la gestion des actifs et la maintenance, sont d'autres exemples des capacités de l'IoT qui peuvent être exploitées. Les applications d'automatisation des services telles que le chauffage, la ventilation et la climatisation, l'éclairage et l'irrigation, ainsi que les systèmes de divertissement, peuvent également bénéficier de la technologie IoT. En outre, le réseau intelligent peut être utilisé en conjonction avec d'autres applications pour améliorer la consommation d'énergie domestique. Le réseau domestique (HAN) permet aux appareils de communiquer avec les compteurs intelligents, ce qui permet de réduire les dépenses tout en maintenant des performances optimales. Pour optimiser l'utilisation des appareils ménagers et éviter les périodes coûteuses ou chargées, il est possible d'utiliser des services dynamiques et intelligents. Par exemple, les cycles du lave-linge ou du lave-vaisselle peuvent être organisés en fonction des préférences et des habitudes de l'utilisateur. Des applications avancées peuvent également suivre les habitudes des utilisateurs en surveillant leurs téléphones portables, améliorant ainsi le confort général de la vie à la maison. En outre, les smartphones peuvent être utilisés comme une télécommande universelle pour gérer tous les dispositifs et appareils domestiques, ce qui permet aux utilisateurs d'éteindre les équipements qui sont restés allumés par inadvertance. [12]

#### **1.4.4 Domaine d'agriculture et sélection**

L'agriculture intelligente face au climat (AAC) désigne une stratégie visant à réformer et à réorienter les pratiques agricoles pour les adapter aux réalités du changement climatique. En conséquence, les méthodes et les techniques utilisées dans la production agricole ont été considérablement modifiées. Le concept d'agriculture a évolué, passant de pratiques traditionnelles à des idées plus modernes et contemporaines. Les chercheurs dans le domaine de l'agriculture ont développé de nouvelles idées et procédures qui intègrent l'utilisation d'appareils intelligents pour évaluer les différents facteurs qui contribuent à une agriculture réussie. Zhao et al. ont prédit les avantages de l'utilisation de la technologie des serres pour les opérations agricoles. En outre, le processus d'automatisation dans la région impliquera l'intégration des concepts technologiques de l'IoT. Liqiang et al. ont proposé une application agricole basée sur les propriétés des réseaux de capteurs sans fil (WSN). Le banc d'essai était constitué de capteurs intégrés dans la structure qui mesuraient la température et l'humidité. En outre, le cadre de l'application capturait périodiquement des images de la croissance des cultures.

### **1.5 Les technologies de communication de l'IoT**

Le concept de l'internet des objets peut être mis en œuvre à l'aide de diverses technologies. Les principales technologies de communication utilisées dans l'IoT sont les suivantes :

#### **1.5.1 Identification par radiofréquence (RFID)**

Un système RFID se compose de plusieurs étiquettes RFID et d'un ou plusieurs lecteurs. Ces étiquettes sont apposées sur des objets et identifiées par une adresse unique. En utilisant des ondes électromagnétiques de radiofréquence, les étiquettes transmettent des données associées à l'objet. Ces données peuvent être lues par le lecteur RFID lorsque l'objet se trouve à proximité. L'un des

principaux avantages de la RFID est qu'elle ne nécessite pas de visibilité directe entre l'étiquette et le lecteur, ce qui permet un suivi en temps réel des objets. L'étiquette RFID se compose d'un petit boîtier contenant un microprocesseur et une antenne. L'antenne reçoit des signaux du lecteur RFID et transmet le signal en retour, ainsi que des données supplémentaires. Hitachi a mis au point une étiquette qui mesure 0,4 x 0,4 x 0,15 mm . Les étiquettes RFID peuvent être classées en trois catégories en fonction de leur source d'énergie. Les étiquettes RFID passives n'ont pas de source d'énergie propre et dépendent de l'énergie transmise par le lecteur RFID pour communiquer. Ces étiquettes sont couramment utilisées dans les chaînes d'approvisionnement, les passeports, les péages électroniques et le suivi des articles. Les étiquettes RFID actives, quant à elles, disposent de leur propre source d'énergie et peuvent établir une communication avec le lecteur. Elles peuvent également intégrer des capteurs externes pour surveiller la température, la pression, les produits chimiques et d'autres variables. Ces étiquettes sont largement utilisées dans la fabrication, les laboratoires médicaux et la gestion des actifs informatiques par télédétection. Les étiquettes RFID semi-passives, comme leur nom l'indique, sont alimentées par le lecteur pour la communication, mais utilisent des piles pour alimenter le microprocesseur. Les étiquettes RFID actives et semi-actives sont plus chères que les étiquettes passives.

### 1.5.2 Communication en champ proche (NFC)

Les technologies NFC et RFID présentent des similitudes, mais l'intégration de lecteurs RFID dans les téléphones portables n'est pas considérée comme faisant partie de la RFID. La NFC est un type spécifique de technologie de communication radio qui peut être activée sur les appareils mobiles en activant des options intégrées ou en rapprochant deux appareils. La NFC est une interface sans fil à courte portée et à faible consommation dérivée de la RFID qui permet le transfert sécurisé de petites quantités de données entre deux appareils proches. Elle permet une communication sûre entre deux appareils intelligents, ce qui n'est pas possible sur de longues distances . La technologie NFC fonctionne dans la gamme de fréquences radio sans licence de 13,56 MHz et a une distance opérationnelle maximale de 20 cm, qui peut être affectée par la taille de l'antenne de l'appareil. Il s'agit d'une liaison sans fil à courte portée et à faible consommation d'énergie qui peut transférer de petites quantités de données entre deux appareils proches sans nécessiter d'appairage préalable, contrairement à Bluetooth. La communication NFC entre objets intelligents nécessite une présence physique, ce qui la rend adaptée à des applications telles que le paiement. La croissance de l'IoT peut être soutenue de manière significative par la technologie NFC, qui peut permettre une connectivité sans fil avec n'importe quel appareil intelligent. En outre, la NFC mobile a le potentiel de transformer les appareils mobiles en divers objets intelligents, tels qu'une carte de crédit pouvant être utilisée pour les paiements. [13]

### 1.5.3 Communication entre machines (M2M)

La communication de machine à machine (M2M) implique la communication entre divers appareils tels que les appareils mobiles, les ordinateurs, les processeurs intégrés, les capteurs intelligents et les actionneurs. La communication M2M devient de plus en plus populaire et des études ont prédit que le nombre d'appareils connectés sans fil, à l'exclusion des téléphones mobiles, atteindra 1,5 milliard d'ici 2014. Le M2M comprend quatre éléments clés : la détection, l'accès hétérogène, le traitement de l'information et les applications et services. La figure 4 illustre les cinq parties de la construction M2M. La structure M2M se compose de cinq éléments clés :

- **Dispositif M2M** : Un appareil qui peut répondre aux demandes de données qu'il contient.
- **Réseau de zone M2M (domaine des dispositifs)** : Réseau qui assure la connectivité entre les dispositifs M2M et les passerelles M2M.
- **Passerelle M2M** : Dispositif qui utilise les capacités M2M pour assurer l'interfonctionnement et l'interconnexion entre les dispositifs M2M et le réseau de communication.
- **Réseaux de communication M2M (domaine des réseaux)** : Réseaux qui facilitent la communication entre la ou les passerelles M2M et l'application M2M.
- **Applications M2M** : Couche intermédiaire qui traite les données par l'intermédiaire de divers services d'application et alimente les moteurs de traitement spécifiques de l'entreprise.

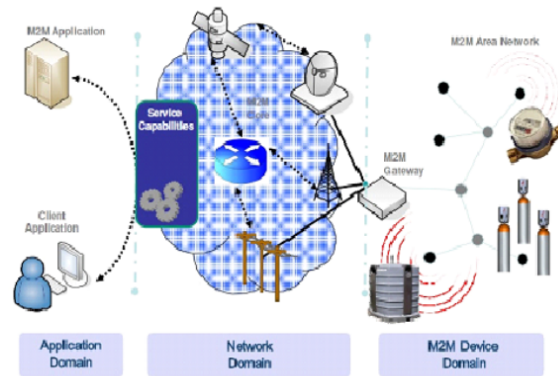


FIGURE 1.2 – Architecture M2M [13]

## 1.6 Architecture de l'IoT

L'architecture d'un système IoT comprend une couche physique, une couche virtuelle ou une combinaison des deux, ainsi que des couches de communication, des utilisateurs, des développeurs, une couche d'entreprise et un grand nombre d'objets physiques, de capteurs, d'actionneurs, de services en nuage et de protocoles IoT spécifiques. Le cadre architectural en couches est illustré à la figure 1.3. Il existe plusieurs architectures spécifiques à des domaines tels que la RFID, l'architecture orientée services, les réseaux de capteurs sans fil, la gestion de la chaîne d'approvisionnement, l'industrie, les soins de santé, la ville intelligente, la logistique, la vie connectée, le big data, l'informatique en nuage, l'informatique sociale et la sécurité, en fonction du scénario actuel d'applicabilité de l'IoT. Un système IoT se compose de plusieurs éléments fonctionnels qui permettent la gestion, la communication, la détection et l'actionnement. Ces éléments structurels sont définis comme suit :[14]

- **Dispositifs** : dotés de capacités de détection, d'actionnement, de surveillance et de contrôle.
- **Communication** : Le bloc de communication gère la communication du système IoT via plusieurs protocoles IoT.
- **Services** : Un système IoT utilise une gamme de services IoT, notamment pour la découverte d'appareils, la publication de données, le contrôle d'appareils et la surveillance d'appareils.
- **Gestion** : Le bloc fonctionnel de gestion offre une série de contrôles pour le système IoT.
- **Sécurité** : Le bloc fonctionnel de sécurité protège le système IoT en offrant des fonctions telles que l'intégrité des messages et du contenu, l'authentification, l'autorisation et la sécurité des données.
- **Application** : Les applications IoT comprennent une interface utilisateur qui permet aux utilisateurs de contrôler et de garder un œil sur diverses caractéristiques du système IoT. Les utilisateurs peuvent également examiner l'état du système et examiner ou évaluer les données traitées à l'aide des applications.

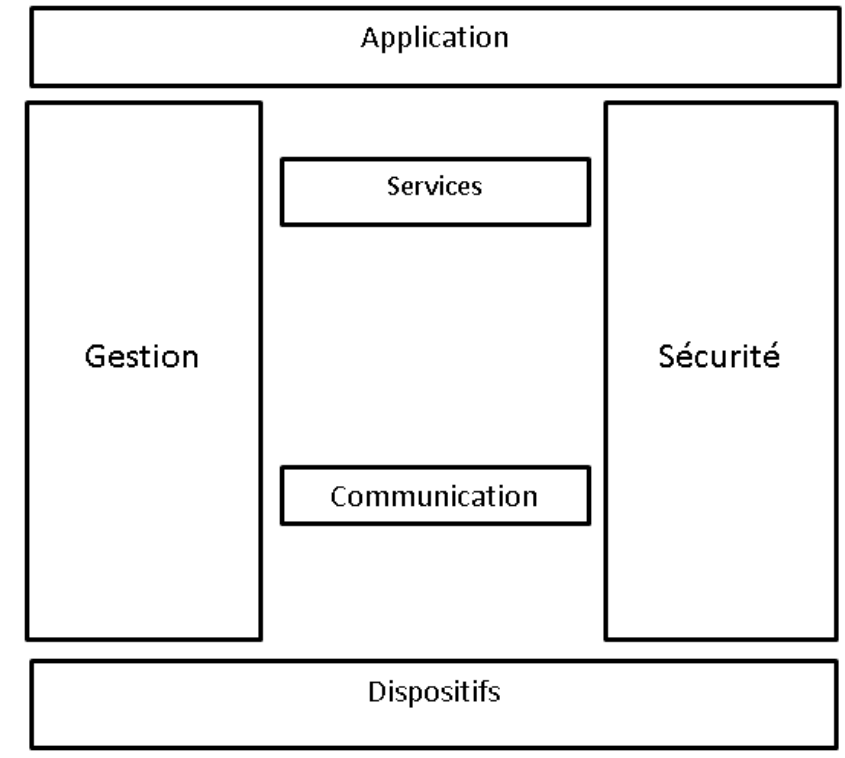


FIGURE 1.3 – Cadre architectural d'un système IoT [14]

## 1.7 Représentations UML des systèmes IoT

L'UML est un langage polyvalent qui peut être appliqué dans divers domaines, notamment le génie logiciel, la modélisation d'entreprise et l'ingénierie des systèmes. Il est largement utilisé dans l'industrie et les universités, et de nombreux outils de développement logiciel prennent en charge l'UML. L'UML a évolué au fil des ans et la dernière version est l'UML 2.5.1, qui a été normalisée par l'Object Management Group (OMG) en 2017. Dans l'ensemble, l'UML est un outil important pour le développement de logiciels, car il permet aux développeurs de communiquer efficacement leurs idées de conception et garantit que toutes les parties prenantes ont une compréhension commune de l'architecture du système logiciel. En fournissant une notation et un vocabulaire standard, l'UML contribue à réduire les ambiguïtés et à améliorer la communication entre les développeurs, les clients et les autres parties prenantes. Le diagramme des cas d'utilisation illustre l'interaction entre les acteurs et les cas d'utilisation dans un système. Un diagramme de classes est une représentation visuelle de la structure et du contenu d'un système à l'aide d'éléments tels que les classes, les paquets et les objets, ainsi que des relations telles que le confinement, l'héritage et les associations. Un diagramme de classes est une représentation visuelle de la structure et du contenu d'un système à l'aide d'éléments tels que les classes, les paquets et les objets, ainsi que des relations telles que le confinement, l'héritage et les associations.

### 1.7.1 Diagrammes d'interaction :

- **Les diagrammes de séquence** : illustrent l'ordre chronologique dans lequel les objets impliqués dans une interaction se produisent au fil du temps, en utilisant des dimensions horizontales et verticales.
- **Les diagrammes de collaboration** : décrivent les objets et leurs relations dans le cadre d'une collaboration, en utilisant des nombres pour indiquer l'ordre des messages. Les diagrammes d'état décrivent les différents états par lesquels passe un objet en réponse à des stimuli ainsi que ses réactions et ses actions.

- **Les diagrammes d'activité** : sont un type de diagramme d'état dans lequel la plupart des états sont des états d'action, et les transitions se produisent lorsque les actions dans les états sources sont terminées. Ces diagrammes se concentrent sur les flux de traitement internes.

### 1.7.2 Diagrammes physiques :

- **Un diagramme de composants** : présente la structure globale du code d'un système, en montrant les dépendances entre les composants tels que les composants exécutables, binaires et le code source.
- **Un diagramme de déploiement** : représente la configuration des objets logiciels, des processus et des unités de traitement d'exécution. Les instances de composants logiciels représentent la manifestation des unités de code pendant l'exécution.

## 1.8 Conclusion :

En conclusion, l'Internet des objets (IoT) a un potentiel énorme pour transformer notre vie quotidienne en connectant des objets intelligents et en fournissant des services créatifs et intelligents. Cependant, le développement de ces systèmes pose des défis tels que la sécurité, la collecte et l'analyse de grandes quantités de données, l'intégration de dispositifs hétérogènes et la vérification de leur comportement. Dans le prochain chapitre, nous aborderons comment les réseaux de Petri peuvent être utilisés pour modéliser et vérifier le comportement des systèmes IoT afin de garantir leur bon fonctionnement.

# Chapitre 2

## Les réseaux de pétri

## 2.1 Introduction

Les réseaux de pétri sont des outils puissants pour modéliser, simuler et vérifier et comprendre les systèmes complexes. Les réseaux de pétri sont des cadres graphiques et mathématiques qui peuvent être utilisés pour représenter divers types de systèmes, allant des processus simples aux systèmes logiciels complexes. Le fondement mathématique des réseaux de pétri les rend particulièrement adaptés à l'analyse formelle et à la vérification du comportement des systèmes, y compris la détection des impasses et des blocages, l'analyse de l'accessibilité et l'évaluation des performances. Dans ce chapitre nous présenterons une introduction sur les réseaux de pétri. On expliquera la définition et les concepts fondamentaux de ces réseaux, ainsi que leurs extensions et leurs propriétés.

## 2.2 Définition de réseaux de pétri :

Un réseau de pétri simple ou de base est défini comme un graphe bi-partie ayant deux types de sommets. Il peut être représenté comme un ensemble de quatre tuple,  $PN = (P, T, F, W)$

- $P$  est un ensemble fini et non vide de places  $P = \{p_1, p_2, p_3, \dots, p_n\}$
- $T$  est un ensemble fini et non vide de transitions  $T = \{t_1, t_2, t_3, \dots, t_n\}$
- $F$  est un ensemble fini et non vide de flux allant d'un lieu à une transition et vice-versa.
- $(P \times T)$  représente les arcs d'entrée et  $(T \times P)$  représente les arcs de sortie notés  $O$ .  $W$  est une fonction de poids ou une valeur de marquage pour les jetons à un endroit.  $W : p = \{1, 2, 3, \dots, n\}$
- Les places et les transitions sont disjointes, c'est-à-dire que  $P \cap T = \emptyset$  et  $T \cap P = \emptyset$
- Le réseau de pétri peut avoir un marquage initial normalement désigné par  $M_0$ . [15]

## 2.3 Concepts de base des réseaux de pétri :

Les réseaux de pétri sont des outils de modélisation utilisés pour représenter et analyser des systèmes complexes. Voici quelques concepts de base des réseaux de pétri : [16]

- **Place** : Les places sont des nœuds dans un réseau de pétri qui représentent l'état du système. Ils peuvent être visualisés sous forme de cercles ou d'ovales. Chaque place peut contenir un certain nombre de jetons, qui représentent les ressources.
- **Transition** : Les transitions dans un réseau de pétri sont des actions ou des événements qui peuvent modifier l'état du système en déplaçant des jetons d'une place à l'autre. Elles représentent les changements possibles dans le système et peuvent être déclenchées lorsque toutes les places d'entrée ont suffisamment de jetons. Ils peuvent être visualisés sous forme de rectangles ou de barres.
- **Jeton** : les jetons sont des unités fondamentales qui représentent les ressources ou les éléments du système. Ils peuvent se déplacer d'un endroit à l'autre et déclencher des transitions dans le réseau. Lorsqu'un jeton se déplace d'un endroit à un autre, il signifie un changement dans l'état du système. Le déplacement des jetons est également appelé "déclenchement" d'une transition. Les jetons sont ajoutés à un endroit lorsqu'une transition ajoute ou produit des ressources.
- **Les arcs** : les places et les transitions sont reliés entre eux par des arcs, qui peuvent être visualisés comme des arêtes dans le réseau. Un arc peut relier une place à une transition, indiquant que la place est une entrée de la transition. Alternativement, un arc peut relier une transition à une place, indiquant que la transition est une sortie de la place.
- **Le marquage** : représente la distribution actuelle des jetons entre les places du réseau. Il s'agit d'une collection de jetons à chaque place, indiquant l'état du système à un moment donné. Le marquage initial fait référence à la distribution des jetons au début de l'analyse ou de la simulation du système. Il est désigné par le symbole  $M_0$  et représente l'état initial du système avant que les transitions ne soient activées.

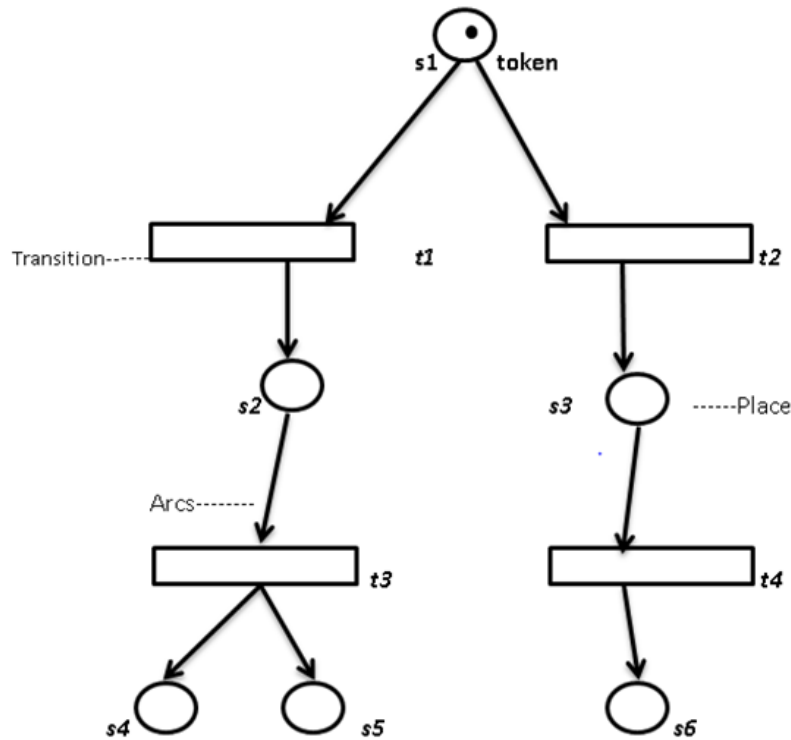


FIGURE 2.1 – Exemple de réseau de pétri [16]

## 2.4 Les caractéristiques des systèmes de réseaux de pétri :

Les systèmes de réseaux de pétri sont des modèles mathématiques utilisés pour représenter et analyser les systèmes concurrents et distribués. Voici quelques caractéristiques clés des systèmes de réseaux de pétri :[17]

### 2.4.1 Exécution séquentielle :

L'exécution séquentielle des réseaux de pétri se réfère à la manière dont les transitions d'un réseau de pétri sont activées et franchies séquentiellement, une après l'autre, dans un ordre spécifié. Dans le cas de ce marquage initial, seule la transition  $t_1$  peut être déclenchée en exécution séquentielle. Après cela, la transition  $t_2$  ne peut être déclenchée qu'après la transition  $t_1$ , tandis que la transition  $t_3$  ne peut être déclenchée qu'après la transition  $t_2$  (voir la Figure 2.2).

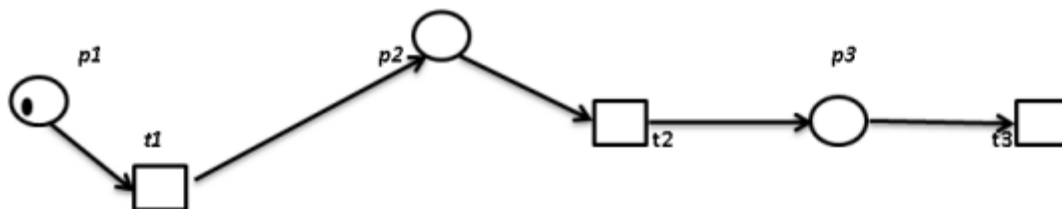


FIGURE 2.2 – Déclenchement séquentiel des transitions [17]

### 2.4.2 Conflit :

Dans les systèmes de réseaux de pétri, le conflit se produit lorsqu'il y a plusieurs transitions activables simultanément, mais qu'une seule d'entre elles peut être exécutée à la fois. Cela peut se produire lorsque plusieurs transitions ont les mêmes places d'entrée et sont donc concurrentes. Dans la figure 2.3, toutes les transitions ( $t_1$ ,  $t_2$  et  $t_3$ ) sont activées. Cependant, si l'une de ces transitions se déclenche, les autres seront désactivées. En outre, nous pouvons supposer que ces transitions impliquent un choix ou un processus de prise de décision.

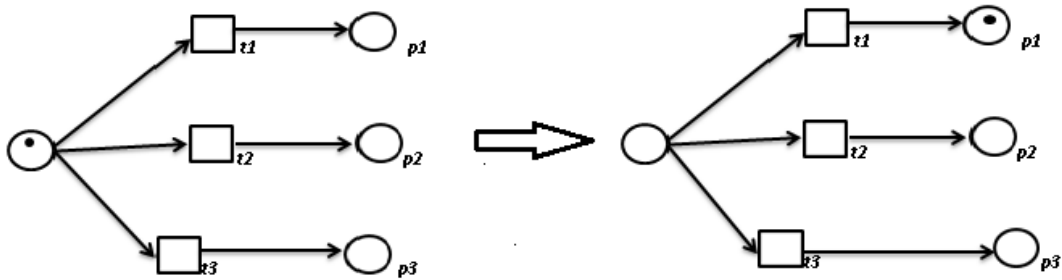


FIGURE 2.3 – Conflit [17]

### 2.4.3 La concurrence :

La concurrence est une caractéristique cruciale des interactions du système, et elle nécessite la présence d'une transition de bifurcation qui dépose des jetons dans deux ou plusieurs emplacements de sortie pour que les transitions soient simultanées. La figure 2.4 illustre la simultanéité : après le déclenchement de la seule transition activée  $t_1$  dans le marquage initial, les transitions  $t_2$ ,  $t_3$  et  $t_4$  sont activées indépendamment et peuvent être déclenchées dans n'importe quel ordre, y compris simultanément.

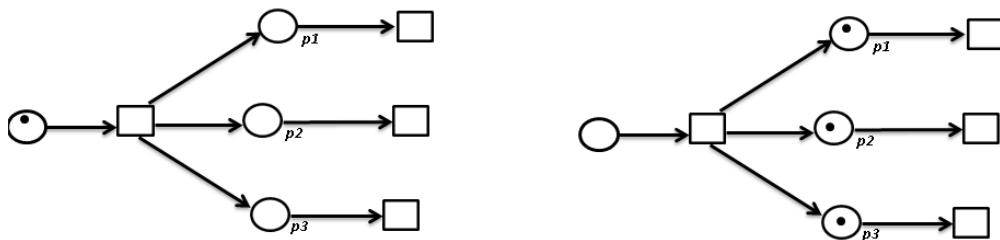


FIGURE 2.4 – Concurrency [17]

### 2.4.4 La synchronisation :

La synchronisation dans les systèmes de réseaux de pétri fait référence à la coordination et à la communication entre les différentes parties du système représentées par les transitions et les places. La figure 2.5 montre des transitions qui représentent la synchronisation des ressources. Dans ce cas, la transition  $t_4$  ne peut être activée que si les trois places,  $p_1$ ,  $p_2$  et  $p_3$  ont des jetons. Cela indique qu'un ensemble complexe d'activités dans d'autres parties du modèle de réseau de

pétri peut avoir conduit à l'arrivée d'un jeton dans chacun de ces trois places. Essentiellement, la transition  $t_4$  représente une opération de jonction.

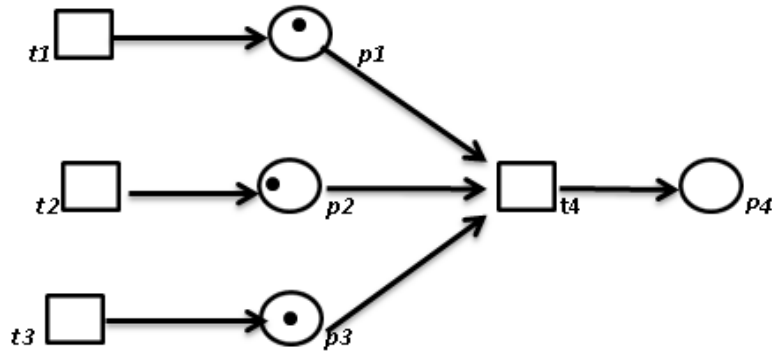


FIGURE 2.5 – Synchronisation [17]

### 2.4.5 L'exclusion mutuelle :

Est une propriété importante dans les systèmes de réseaux de Pétri, et elle concerne le fait qu'une seule transition peut être activée et exécutée à la fois dans une certaine partie du système. Cela garantit qu'aucun conflit ne se produit lorsqu'il y a des ressources partagées ou des actions qui ne peuvent pas être effectuées simultanément. Lorsque deux processus ne peuvent se dérouler simultanément en raison de l'utilisation de ressources partagées, on dit qu'ils s'excluent mutuellement. Cette situation est illustrée dans la figure 2.6, où deux machines partagent un robot pour le chargement et le déchargement.

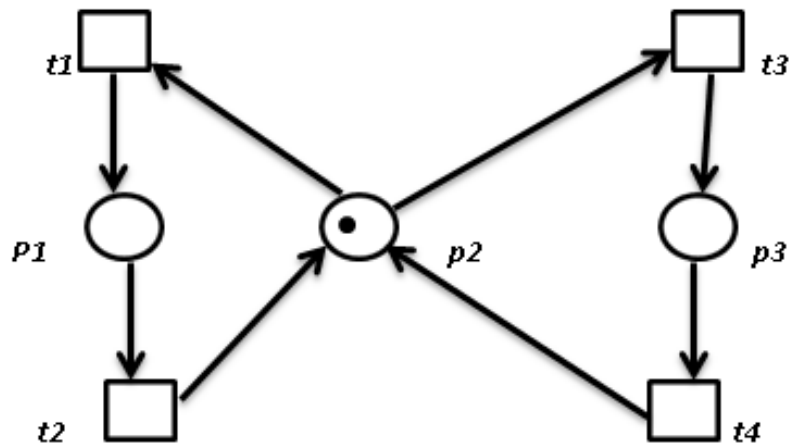


FIGURE 2.6 – Processus mutuellement exclusifs [17]

## 2.5 Les propriétés de réseau de Pétri :

Les réseaux de Petri sont des outils mathématiques qui peuvent être utilisés pour modéliser un système et évaluer ses caractéristiques fonctionnelles dans le contexte du domaine d'application. Ces caractéristiques aident le concepteur du système à déterminer si le système se comporte comme

prévu. Les réseaux de Petri permettent d'analyser des propriétés. L'utilisation des réseaux de Petri peut donner un aperçu sur des caractéristiques psychologiques du système, telles que sa capacité à exécuter des tâches efficacement et à gérer la complexité.

### **2.5.1 L'accessibilité :**

Lors de la construction de systèmes pilotés par les événements, il est important de déterminer si le système peut atteindre un certain état ou présenter un comportement particulier. La capacité à atteindre un marquage spécifique par le biais d'une séquence de déclenchement est connue sous le nom de problème d'accessibilité. En d'autres termes, la question est de savoir s'il existe une séquence d'actions qui peut faire passer le système de son état actuel à un état souhaité. Le problème de l'accessibilité est une question fondamentale dans l'analyse des réseaux de pétri et joue un rôle crucial dans la vérification de l'exactitude du système.

### **2.5.2 Délimitation et sécurité :**

Dans les réseaux de pétri, les places sont couramment utilisées pour représenter les espaces de stockage des informations dans les systèmes informatiques et de communication, ainsi que les zones de stockage des produits et des outils dans les systèmes de fabrication. Il est essentiel de s'assurer que les mesures de contrôle prévues empêchent le débordement de ces zones de stockage. Le concept de délimitation est une caractéristique des réseaux de pétri qui peut aider à identifier les débordements potentiels dans le système modélisé. La délimitation fait référence à la propriété selon laquelle le nombre de jetons à n'importe quel endroit du réseau de pétri doit rester dans une certaine fourchette. En analysant la propriété de délimitation d'un réseau de pétri, nous pouvons déterminer si le système peut atteindre un état dans lequel une place contient un nombre infini de jetons, ce qui indique une condition de débordement. Par conséquent, la délimitation est un concept crucial dans l'analyse et la vérification des réseaux de pétri.

### **2.5.3 Le marquage de terminaison :**

On dit un réseau de pétri qu'il se termine s'il n'existe aucune séquence de déclenchement possible qui puisse se poursuivre indéfiniment. En d'autres termes, s'il existe un nombre fini de transitions qui peuvent être déclenchées, et aucune autre transition n'est activée, alors le réseau de pétri se termine. Cette propriété est souhaitable dans de nombreuses applications, car elle garantit que le système modélisé par le réseau de pétri atteindra finalement un état stable ou se terminera.

### **2.5.4 Le blocage :**

Une transition est bloquée si elle ne peut jamais être déclenchée

### **2.5.5 Le mort :**

Dans le contexte des réseaux de pétri, une transition est considérée comme morte si aucun arc n'y mène dans l'arbre d'accessibilité du réseau de pétri. En d'autres termes, il n'y a aucun moyen pour les jetons d'atteindre les places d'entrée de la transition morte, et celle-ci ne peut donc jamais être déclenchée. Cela peut se produire lorsqu'une transition n'est pas correctement connectée au reste du réseau de pétri ou lorsqu'elle est déconnectée du marquage initial.

### **2.5.6 La vivacité :**

Dans le contexte des réseaux de pétri, le caractère vivant fait référence à la propriété d'un système qui garantit l'existence d'une séquence de déclenchement qui mène à un état où toutes les transitions activées peuvent finalement se déclencher. Un réseau de pétri est dit vivant s'il est possible d'atteindre un état à partir de n'importe quelle transition peut être déclenchée dans un état futur, étant donné qu'il y a des jetons disponibles dans les places d'entrée de cette transition. Cette propriété garantit que le système peut toujours progresser et qu'il n'est pas bloqué dans un état d'impasse.

## 2.6 Extension de réseau de pétri :

L'extension de réseau de pétri est une modification du réseau de Petri traditionnel, qui ajoute des fonctionnalités supplémentaires pour représenter des processus plus complexes. Les extensions de réseau de pétri les plus courantes sont : réseaux de pétri temporels, réseaux de pétri colorés, réseaux de pétri hiérarchiques, réseaux de pétri stochastiques

### 2.6.1 Définition des réseaux de pétri colorés (CPN) :

De manière formelle, un CPN est un tuple [1, 8] :

- $CPN = (\Sigma, P, T, A, N, C, G, E, M_0)$
- $\Sigma$  : est un ensemble fini de types non vides, également appelé ensembles colorés.
- $P$  est un ensemble fini de places.
- $T$  est un ensemble fini de Transitions.
- $A$  est un ensemble fini d'Arcs tel que :  $P \cap T = P \cap A = T \cap A = \emptyset$ .
- $N$  est une fonction de nœud. Elle est définie à partir de  $A$  en "coloré sur les arcs"  $P \times T \cup T \cap P$ .
- $C$  est une fonction de couleur. Elle est définie à partir de  $P$  en  $\Sigma$  "jeton".  $G = P \times \Sigma$
- $G$  est une fonction de garde. Elle est définie à partir de  $T$  dans expressions telles que : "Fonction booléenne avec probabilité".
- $E$  est une fonction d'expression d'arc. Elle est définie à partir de  $A$  en expressions telles que : i.e. (check  $k=n$ )  $\forall a \in A : [Type(E(a)) = C(p) \cap Type(Var(E(a))) \subseteq \Sigma]$  . où  $P$  est la place de  $N(a)$ . [18]

### 2.6.2 Analyse de CPN

L'analyse des réseaux de pétri colorés comprend à la fois la vérification et la simulation du comportement du système modélisé. Voici une description de ces deux aspects :

- **La simulation** : Lors de la construction d'un CP-net, des simulations sont utilisées pour valider le modèle et s'assurer qu'il se comporte comme prévu. Ce processus est itératif, le modèle initial ne couvrant que certaines parties du système et étant ensuite étendu et détaillé. En simulant le modèle tout au long du processus de conception, les concepteurs peuvent en apprendre davantage sur le système et identifier les erreurs dès le début. Une fois le modèle CPN débogué, il peut être analysé de différentes manières. Il est possible d'effectuer des simulations automatiques, qui sont similaires à des exécutions de programmes et peuvent se produire à un rythme élevé de centaines ou de milliers de transitions par seconde. Des délais peuvent être spécifiés pour représenter la durée des actions dans le système et étudier ses performances. Cette approche permet aux concepteurs d'optimiser les performances du système et d'identifier les goulets d'étranglement potentiels.
- **La vérification** : Les modèles CPN peuvent être vérifiés pour s'assurer qu'ils se comportent comme prévu. La méthode de vérification la plus courante consiste à créer des espaces d'états, qui sont des graphiques montrant tous les états et transitions possibles du système. Cependant, les espaces d'états peuvent devenir très grands, il est donc souvent nécessaire d'utiliser des espaces d'états partiels ou condensés. Une autre méthode consiste à utiliser des invariants de lieu, qui sont similaires aux invariants utilisés dans la vérification des programmes. Cette méthode est plus difficile et nécessite des compétences spécialisées, c'est pourquoi elle n'est pas couramment utilisée dans les projets industriels. Toutefois, il est possible d'intégrer ces compétences dans les outils d'assistance afin de rendre les invariants de place plus accessibles aux praticiens.

## 2.7 Conclusion

En conclusion, Les réseaux de pétri fournissent un cadre graphique et mathématique pour représenter et analyser le comportement de ces systèmes, y compris la détection des blocages, l'analyse de la vivacité et l'évaluation des performances. En outre, les réseaux de pétri peuvent être utilisés pour la vérification formelle du comportement du système, garantissant que le système fonctionne comme prévu et répond à ses spécifications de conception. Le chapitre suivant se concentre sur les systèmes IoT qui devient de plus en plus complexes et difficiles à vérifier, et les réseaux de pétri constituent un moyen efficace de modéliser et d'analyser leur comportement.

Chapitre **3**

# La vérification des systèmes de l'internet des objets

### 3.1 Introduction

Les systèmes IoT (Internet of Things) sont composés de dispositifs connectés qui interagissent avec l'environnement physique et communiquent entre eux via Internet. La vérification des systèmes IoT peut inclure de près de fiabilité, des près d'adaptation, de près de sécurité, de près de performance. ce qui permet d'atteindre de meilleure qualité de logiciel. En résumé, la vérification des systèmes IoT est une étape cruciale pour garantir la fiabilité, la sécurité et les performances optimales des dispositifs IoT, tout en minimisant les risques d'échecs pour les utilisateurs et les organisations. Dans ce chapitre nous présenterons une définition de La vérification formelle des applications de l'Internet des objets et on expliquera les techniques formelles ainsi que les travaux connexes de ces méthodes.

### 3.2 La vérification formelle des applications de l'IoT :

La vérification formelle est une technique rigoureuse utilisée pour garantir la faisabilité et la Fiabilité des systèmes matériels et logiciels. La vérification formelle peut être très utile lorsqu'il s'agit d'applications de l'Internet des objets (IoT) pour confirmer la faisabilité et la sécurité de ces systèmes. Mais en raison de la taille, de la complexité et de l'hétérogénéité des systèmes de L'IoT, la vérification formelle des applications de l'IoT se heurte à des difficultés particulières. Cette technique aboutit à la création d'outils de vérification formelle capables de contrôler l'ensemble du comportement d'un système et de démontrer mathématiquement qu'il n'y a plus des failles. Il est clair que la simulation et l'émulation de systèmes ne peuvent pas garantir la vérification et la découverte de toutes les failles. C'est pourquoi les techniques de vérification formelle contribuent au développement de nouveaux systèmes matériels ou logiciels entièrement sécurisés. Il existe trois principaux types de vérification : la vérification de modèle (model checking) et l'algèbre de processus et la preuve par la théorème. L'analyse et la validation du modèle d'application de l'IoT à l'aide d'approches formelles, y compris le model checking, l'algèbre de processus et la preuve par le théorème. Ces techniques peuvent utiliser l'exploration systématique de tous les états potentiels du système ou l'inférence logique pour prouver la robustesse du système. La surveillance de l'environnement, y compris les maisons intelligentes, les villes, les automobiles et les systèmes industriels, fournit de nouvelles questions ouvertes pour valider les études de cas qui ont déjà été réalisées. et voici quelque informations sur un outil utilisée pour la vérification formelle.

[19]

### 3.3 CPN Tools :

CPN Tools est un outil logiciel complet conçu pour l'édition, la simulation et l'analyse des réseaux de pétri colorés (CPN). Il offre une interface utilisateur graphique (GUI) qui incorpore des techniques d'interaction avancées telles que les lunettes à outils, les menus de marquage et l'interaction bi-manuelle afin d'améliorer l'expérience de l'utilisateur. L'une des caractéristiques remarquables de CPN Tools est son système de retour d'information, qui fournit des messages d'erreur contextuels et indique les relations de dépendance entre les différents éléments du réseau. Cela permet aux utilisateurs d'identifier et de résoudre les problèmes plus efficacement.

[20]

#### 3.3.1 Edition des réseaux CP :

Étant donné qu'il existe souvent plusieurs façons d'effectuer une activité donnée, l'édition des réseaux CP avec CPN Tools est simple, rapide et adaptable. Par exemple, les menus de marquage, les palettes et les lunettes à outils peuvent être utilisés pour établir des emplacements. CPN Tools assiste l'utilisateur pendant l'édition d'un filet de diverses manières, notamment en lui offrant une série de commentaires graphiques concernant la syntaxe du filet et l'état de l'outil ou, dans certains cas, en alignant automatiquement les objets. Pendant la construction d'un réseau, sa syntaxe est validée et le code de simulation pour le réseau est généré automatiquement. Cette section

explique comment utiliser les outils CPN pour créer et modifier les réseaux CPN.

### 3.3.2 Outils pour l'édition des réseaux CP :

CPN Tools est un logiciel qui fournit une interface conviviale pour la création d'éléments de réseaux CP, tels que les places, les transitions et les arcs. Il offre plusieurs fonctions et outils pour faciliter le processus de conception des réseaux CPN. Voici quelques-uns des outils et des fonctionnalités disponibles dans CPN Tools :

- **Palettes** : CPN Tools comprend des palettes qui contiennent des symboles graphiques prédéfinis pour les éléments du réseau CP. Ces palettes permettent aux utilisateurs de sélectionner et de créer facilement des places, des transitions et des arcs en faisant glisser les symboles sur le canevas.
- **Lunettes d'outils** : Les lunettes sont des panneaux interactifs qui fournissent des outils et des options spécifiques liés à l'élément CP-net sélectionné. Lorsqu'un utilisateur sélectionne une place ou une transition, la fenêtre d'outils correspondante affiche des options permettant de configurer les propriétés, les étiquettes et d'autres attributs de l'élément sélectionné.
- **Menus de marquage** : CPN Tools utilise des menus de marquage pour fournir un accès rapide aux commandes et opérations fréquemment utilisées. En cliquant avec le bouton droit de la souris sur une place, une transition ou un arc, les utilisateurs peuvent faire apparaître un menu de marquage contextuel avec des options de manipulation et d'édition de l'élément sélectionné.
- **Lignes directrices magnétiques** : Les lignes directrices magnétiques dans CPN Tools sont utilisées pour aligner les éléments CP-net sur le canevas. Les utilisateurs peuvent activer des lignes directrices qui aident à positionner les places, les transitions et les arcs avec précision. Les objets peuvent s'accrocher à ces lignes directrices, ce qui garantit un alignement et une disposition corrects au sein du réseau CPN.
- **Alignement automatique** : CPN Tools offre des fonctions d'alignement automatique qui aident les utilisateurs à aligner les objets même lorsque les directives ne sont pas utilisées. Par exemple, si une place est déplacée près d'être alignée verticalement avec une transition, CPN Tools enclenchera automatiquement la place pour l'aligner parfaitement avec la transition.

## 3.4 Analyse des réseaux CP :

CPN Tools prend actuellement en charge deux types d'analyse pour les réseaux CP : la simulation et l'analyse de l'espace d'état. Et la vérification .

### 3.4.1 Les outils de vérification :

CPN Tools fournit également des outils de vérification pour aider à la vérification formelle des réseaux CPN. Ces outils vous permettent d'analyser et de vérifier des propriétés et des comportements spécifiques de vos réseaux CPN. Voici quelques techniques de vérification courantes disponibles dans CPN Tools.

- **Analyse des invariants** : CPN Tools vous permet de spécifier des invariants, qui sont des conditions qui doivent rester vraies à tout moment pendant l'exécution du réseau CPN. L'outil peut vérifier si les invariants spécifiés sont violés dans n'importe quel état atteignable du CP-net. L'analyse des invariants permet de s'assurer que certaines propriétés ou contraintes sont toujours satisfaites.
- **Analyse de faisabilité** : L'analyse de faisabilité permet d'examiner si des états ou des marquages spécifiques du réseau CP peuvent être atteints ou non. Vous pouvez définir des requêtes de faisabilité pour vérifier si un état particulier est accessible à partir de l'état initial ou si certains états sont inaccessibles. L'analyse de l'accessibilité permet d'identifier les états qui devraient être accessibles ou les états qui devraient être évités.
- **Analyse des blocages** : L'analyse des blocages est utilisée pour détecter les situations dans lesquelles aucune autre transition ne peut être exécutée dans le réseau CP, ce qui conduit

à un blocage. CPN Tools peut analyser automatiquement le réseau CP pour identifier les blocages potentiels dans le système. Cela permet d'identifier et de résoudre les problèmes qui peuvent empêcher le réseau CP de progresser.

- **Analyse de vivacité** : L'analyse de la vivacité vise à s'assurer que certaines propriétés souhaitables sont finalement atteintes dans le réseau CP. Par exemple, vous pouvez spécifier des propriétés de vivacité pour vérifier si une transition spécifique est finalement activée ou si un marquage particulier peut être atteint. L'analyse de vivacité permet de vérifier que des comportements ou des événements importants finiront par se produire.

### 3.5 Les travaux connexes :

- Xiaopeng Niu et Zhiliang Wang ont développé un modèle de maison intelligente sensible au contexte basé sur l'intégration d'UML (Unified Modeling Language) et de réseaux de Pétri colorés (CPN). Dans leur recherche, ils ont proposé une approche de modélisation qui combine le pouvoir d'expression d'UML pour la spécification du système et les capacités d'analyse formelle de CPN pour capturer et analyser le comportement contextuel. Le modèle contextuel de la maison intelligente est axé sur la représentation et l'analyse du contexte et des interactions au sein d'un environnement de maison intelligente. UML a été utilisé pour capturer l'architecture du système de haut niveau, y compris l'identification des éléments de contexte, des capteurs et des actionneurs. Le comportement du système et les interactions entre les différents composants ont été représentés à l'aide de CPN. [21]
- Sun et al. ont introduit une approche pour la modélisation du contexte de l'environnement de la voiture intelligente en utilisant la modélisation hiérarchique du contexte. Dans leur recherche, ils ont utilisé des réseaux de Petri (RP) pour représenter et modéliser les situations contextuelles. Dans l'approche proposée, les places du réseau de Petri correspondent à différentes situations contextuelles dans l'environnement de la voiture intelligente. Ces situations contextuelles peuvent inclure des facteurs tels que l'état des routes, les embouteillages, les conditions météorologiques et la présence de piétons. D'autre part, les transitions dans le réseau de Petri représentaient les relations et les transitions entre les situations contextuelles. Sun et al. ont pu saisir efficacement la nature complexe et dynamique de l'environnement de la voiture intelligente et des facteurs contextuels qui y sont associés. L'approche de modélisation hiérarchique du contexte a facilité la représentation et l'analyse des interdépendances et des transitions entre les différentes situations contextuelles. [22]
- Silva et al. ont présenté une approche de modélisation pour une bibliothèque intelligente utilisant des réseaux de Petri colorés (CPN). Dans leur recherche, ils ont utilisé les CPN pour représenter diverses caractéristiques et états des entités au sein du système de bibliothèque intelligente. Les jetons colorés du CPN ont été utilisés pour représenter les caractéristiques des entités, telles que les utilisateurs et les objets de la bibliothèque. Chaque jeton contient des informations spécifiques sur l'entité correspondante. Les états de ces entités étaient représentés par des places dans le modèle CPN, où un jeton placé dans une place particulière indiquait l'existence d'une entité dans cet état. Les transitions du modèle CPN représentent les actions effectuées par les utilisateurs et le système dans la bibliothèque intelligente. Ces transitions capturent les interactions et les opérations effectuées par les entités au sein du système. [23]
- Haiouni et al. ont utilisé des réseaux de Petri colorés (CPN) pour modéliser le contexte et divers services appliqués à des scénarios de maison intelligente. Dans leur recherche, ils ont représenté les informations contextuelles à l'aide de jetons, un contexte étant constitué d'un ensemble d'informations contextuelles. Les places dans le modèle CPN ont été classées en deux types : les places de ressources et les places d'états d'action. Les places du modèle CPN ont été classées en deux types : les places de ressources et les places d'états d'action.

Les places de ressources ont été utilisées pour représenter les ressources disponibles dans l'environnement de la maison intelligente, tandis que les places d'états d'action ont représenté les différents états pouvant être pris par le système ou les entités au sein du système. Haiouni et al. ont capturé efficacement le contexte et les services dans les scénarios de maison intelligente. L'utilisation de jetons pour représenter les informations de contexte et la classification des places ont facilité la modélisation et l'analyse du comportement du système, y compris la disponibilité des ressources et les différents états des actions. [24]

- Kwon a introduit une approche de réseau de Petri coloré modifié (CPN) pour modéliser un système contextuel de campus intelligent. Dans cette approche, le système a été décomposé en plusieurs modèles, chacun représentant différents types de services contextuels. Ces modèles capturent les différentes fonctionnalités et les différents comportements du système. En outre, Kwon a utilisé un réseau contextuel pour représenter les changements de contexte dans l'environnement du campus intelligent. Le réseau contextuel a été conçu pour gérer et suivre les changements dynamiques des informations contextuelles, qui étaient indépendants des modèles représentant les services contextuels. En utilisant le CPN modifié, Kwon a modélisé et analysé efficacement le système contextuel du Smart Campus. La décomposition en modèles a permis une représentation modulaire des différents types de services contextuels, tandis que le réseau contextuel a facilité la représentation des changements de contexte dynamiques au sein du système. [25]
- Han et al. ont introduit une méthodologie de modèle tenant compte du contexte pour un service d'évitement des collisions automobiles, en utilisant une version étendue des réseaux de pétri colorés à intervalle de temps (ITCPN). Dans leur recherche, les places dans le modèle ITCPN représentent différents contextes, tandis que la couleur du jeton représente des informations contextuelles spécifiques associées à cette place. Les transitions du modèle ITCPN représentaient les règles de dérivation du contexte déduit ou des opérations au sein du service de prévention des collisions automobiles. Ces transitions capturent la logique et les processus de prise de décision basés sur les informations contextuelles disponibles. Les arcs du modèle représentent les relations entre les règles et le contexte, les reliant et définissant le flux d'informations et d'opérations. [26]
- Hu et al. ont introduit une approche de modélisation des services contextuels basée sur les règles ECA (Event-Condition-Action) et les réseaux de Petri colorés (CPN). Dans leur recherche, ils ont proposé une méthodologie qui combine les règles ECA pour capturer les événements contextuels et les actions avec les CPN temporels pour modéliser et analyser le comportement des services contextuels. Dans cette approche, les places du modèle CPN temporisé représentent des événements. Chaque jeton d'une place contient des informations sur le type d'événement qui s'est produit. Les transitions du modèle représentent les actions déclenchées par les événements. Les expressions d'arc ou les fonctions de garde ont été utilisées pour décrire les conditions qui doivent être remplies pour qu'une transition se déclenche. [27]
- Reignier et al. ont utilisé un réseau de Petri synchronisé pour modéliser un scénario de conférence intelligente. Dans leur recherche, ils ont considéré les situations et leurs concepts associés (tels que les activités, les rôles ou les relations) comme des métamodèles de contexte. Les places du réseau de Petri ont été utilisées pour représenter différentes situations dans le scénario de la conférence intelligente. Dans ce contexte, un événement associé à une transition dans le modèle du réseau de Petri représentait le changement d'état des concepts liés aux situations. Les transitions capturaient les actions ou les événements qui déclenchaient les changements d'état du système, et les événements associés étaient utilisés pour signifier la transition entre les différents états des concepts. [28]

### **3.6 Conclusion :**

En conclusion, la vérification des systèmes IoT est un processus essentiel pour garantir le bon fonctionnement, la sécurité et la performance des dispositifs IoT. Les défis spécifiques liés à la diversité des plateformes, des protocoles, des contraintes de ressources et de la sécurité nécessitent des approches de vérification adaptées. Dans le prochain chapitre, nous examinerons une étude de cas pratique de la vérification des systèmes IoT. Cette étude de cas nous permettra de voir comment faire la vérification d'un système IoT à l'aide de réseau de Pétri coloré .En mettant l'accent sur l'outil de CpnTools.

## Etude de cas

### 4.1 Introduction :

L'eau est une ressource essentielle pour la santé et le bien-être de l'homme. Les effets de la contamination de l'eau sur la santé humaine peuvent toutefois être graves. Il est donc essentiel de mettre en place des systèmes de surveillance efficaces afin d'identifier rapidement tout problème potentiel et de prendre les mesures nécessaires. Le système intelligent de l'eau potable de cette étude de cas, qui adopte une approche créative et proactive pour garantir la qualité de l'eau potable, tente de résoudre cette difficulté. Ce système peut recueillir des données à partir de capteurs placés sur le réseau de distribution d'eau en utilisant les avancées techniques. Ces capteurs mesurent des variables importantes telles que la turbidité, le pH, la conductivité électrique. La conception complexe et la fonctionnalité du système intelligent de l'eau potable sont les principaux sujets de cette étude de cas. Nous examinerons une modélisation du système, notamment une vérification de système à l'aide de réseau de pétri colorée. Nous examinerons également les techniques d'analyse des données.

### 4.2 Modélisation de système :

La modélisation d'un système à l'aide de l'UML (Unified Modeling Language) offre une approche structurée et visuelle pour comprendre, concevoir et communiquer les différents aspects du système. L'UML fournit un ensemble de diagrammes qui permettent de représenter les fonctionnalités, les interactions, les structures et le déploiement du système. La modélisation UML permet de visualiser les composants clés du système, tels que les capteurs, l'alarme, le cloud. Dans cette section suivante, nous présenterons différents diagrammes UML utilisés pour la modélisation d'un système intelligent de surveillance de l'eau potable.

### 4.3 Diagramme de cas d'utilisation :

permet de décrire les interactions entre les acteurs (utilisateurs ou systèmes externes) et un système donné. Le diagramme de cas d'utilisation met l'accent sur les objectifs fonctionnels du système du point de vue des acteurs. Il montre les différentes actions (appelées cas d'action ou scénarios) qu'un acteur peut effectuer et comment ces actions interagissent avec le système.

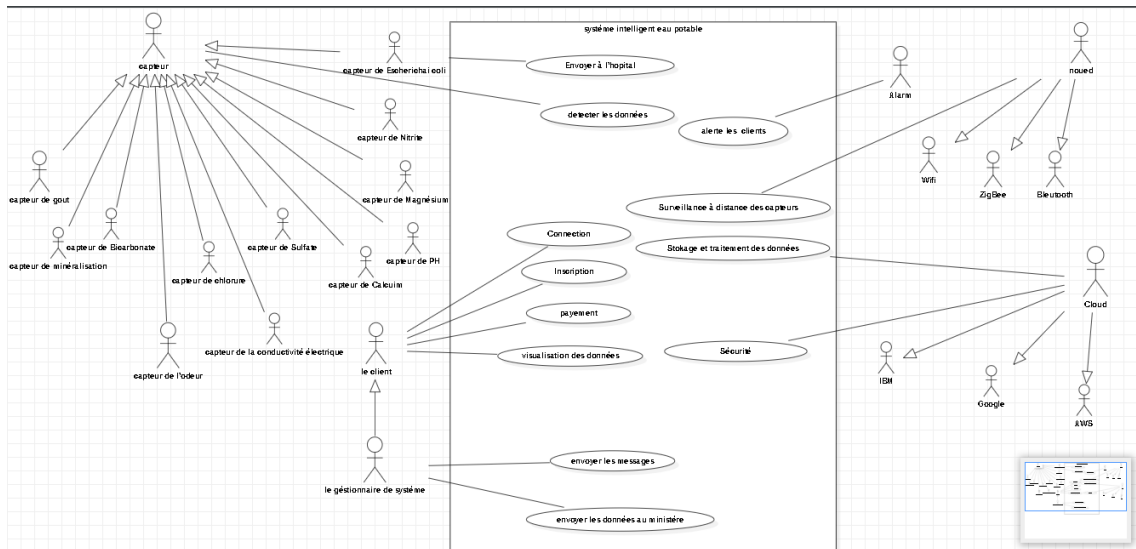


FIGURE 4.1 – Diagramme de cas d'utilisation de système

## 4.4 Diagramme de séquence

utilisé pour représenter l'interaction entre différents objets ou acteurs dans un système. Est couramment utilisés pour modéliser des scénarios d'utilisation, des interactions système, des flux de travail, des communications réseau, etc. Ils sont utiles pour comprendre le comportement dynamique d'un système et pour identifier les dépendances et les échanges d'informations entre les différents composants.

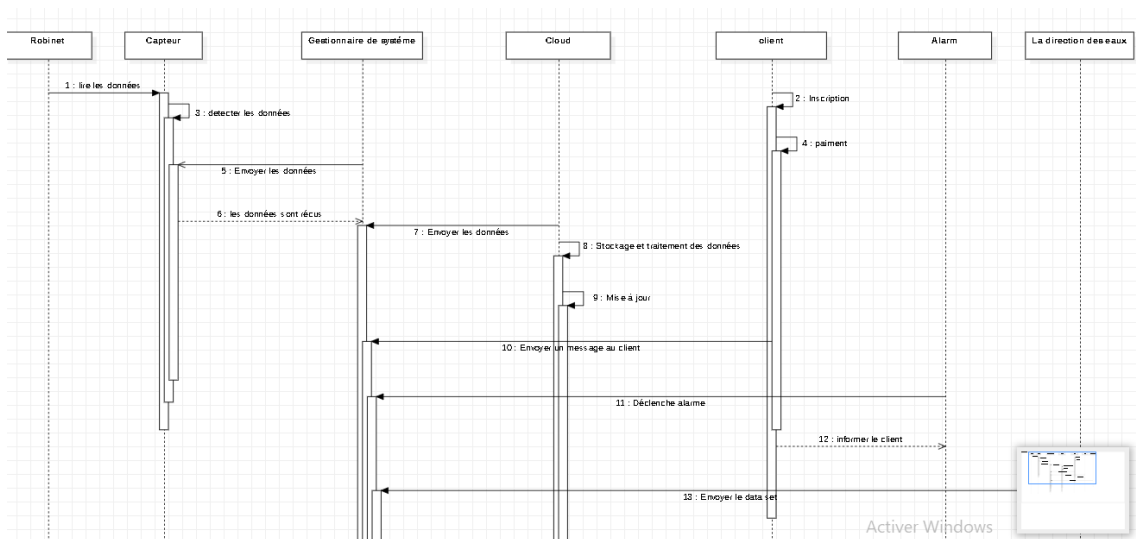


FIGURE 4.2 – Diagramme de séquence de système

## 4.5 Diagramme d'activité :

est couramment utilisé pour modéliser des processus métier, des flux de travail, des algorithmes, des scénarios système, etc. Ils sont utiles pour comprendre le déroulement d'un processus et pour identifier les actions à effectuer, les décisions à prendre et les dépendances entre les différentes étapes. Ils sont également utiles pour communiquer et documenter visuellement les processus.

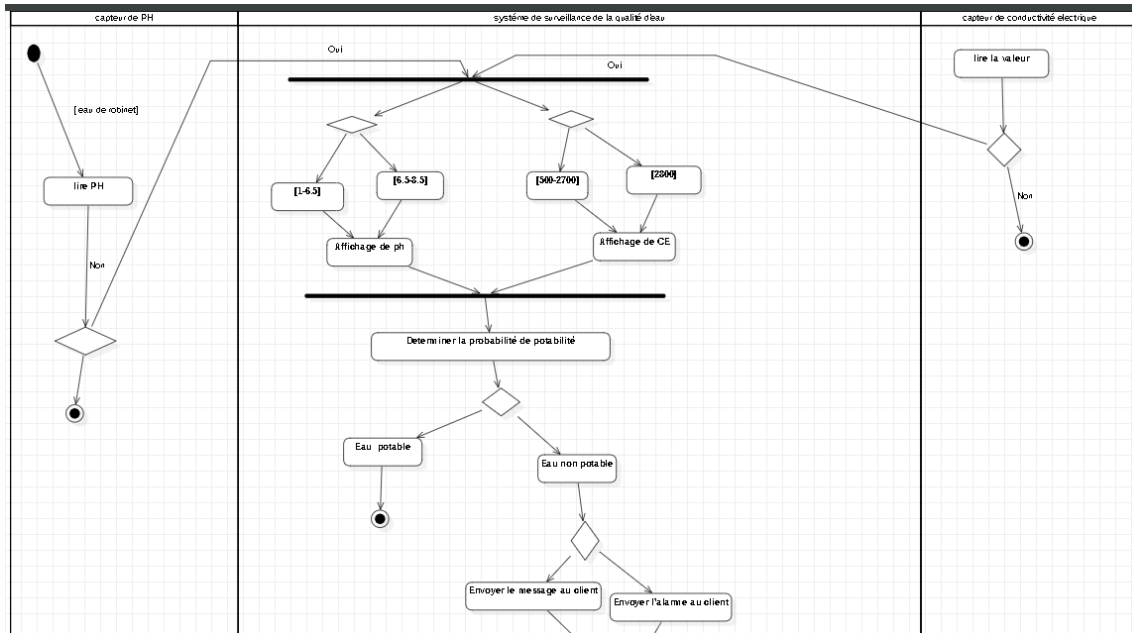


FIGURE 4.3 – Diagramme d’activité de système

## 4.6 Vérification comportementale de système :

La vérification comportementale de systèmes à l’aide de réseaux de Pétri colorés est une approche utilisée pour vérifier et évaluer le comportement de systèmes. Les réseaux de Pétri colorés sont des modèles mathématiques qui permettent de représenter les états et les transitions d’un système. Un réseau de Pétri coloré peut être utilisé pour modéliser le comportement attendu du système, y compris les capteurs, les actuateurs et les différentes étapes de traitement de l’eau. L’utilisation des réseaux de Pétri colorés pour la vérification comportementale offre plusieurs avantages. Ils permettent une représentation visuelle claire du système et de ses interactions, ce qui facilite la détection des erreurs. De plus, ils offrent une analyse formelle permettant de vérifier la fiabilité du système et d’identifier d’éventuels problèmes.

### 4.6.1 Règles de correspondance entre le diagramme d’activité UML et les PN/CPN

Les chercheurs ont largement étudié le processus de mise en correspondance des diagrammes d’activité UML 2.0 avec les réseaux de Pétri (PN) ou les réseaux de Pétri colorés (CPN). Dans leurs études, ils ont proposé des règles de mise en correspondance pour établir un lien entre les diagrammes d’activité UML et les PN/CPN. Ces règles de mappage fournissent des lignes directrices sur la manière de transformer les éléments des diagrammes d’activité UML en constructions PN/CPN correspondantes. La figure 4.4 illustre les règles de mise en correspondance proposées par les chercheurs. En utilisant les règles de mise en correspondance de la figure 4.4 et le modèle UML de la figure 4.3, un service contextuel est modélisé sur la base de la CPN,

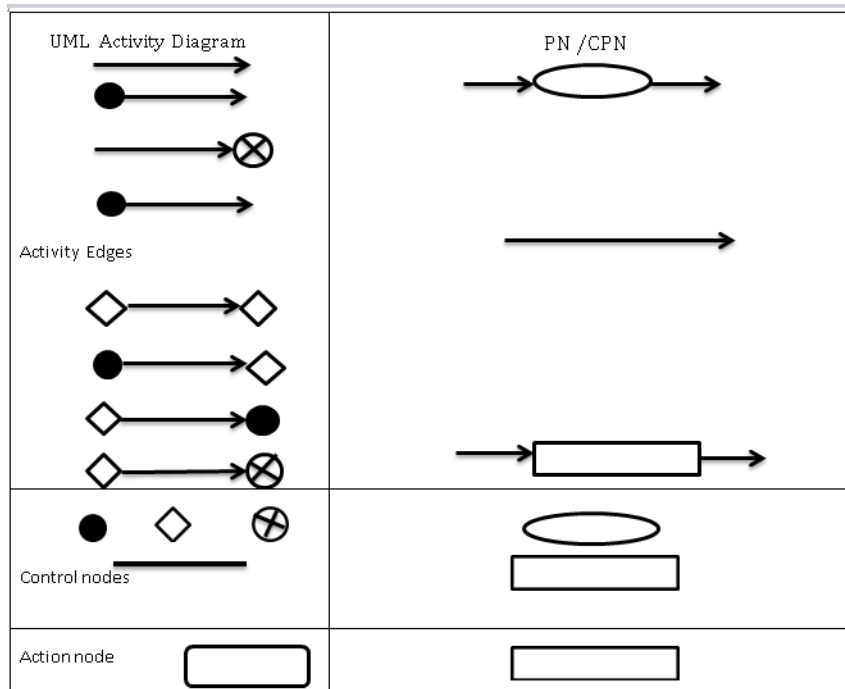


FIGURE 4.4 – Mappage des règles du diagramme d’activité UML au CPN [21]

#### 4.6.2 La vérification de la propriété de la fiabilité d’un système

La vérification de la propriété de la fiabilité d’un système intelligent de surveillance de l’eau potable à l’aide des réseaux de Petri colorée est une approche utilisée pour évaluer la confiance et la robustesse d’un tel système. Les réseaux de Petri colorée offrent un cadre formel pour modéliser le comportement et les interactions des composants du système. En utilisant les réseaux de Petri, il est possible de représenter le système de surveillance de l’eau potable sous forme de places et de transitions, où les places représentent les états du système et les transitions représentent les événements ou les actions qui se produisent. Les arcs définissent les relations de dépendance entre les places et les transitions. la vérification de la propriété de la fiabilité d’un système intelligent de surveillance de l’eau potable à l’aide des réseaux de Petri vise à garantir que le système fonctionne de manière fiable, résiliente et conforme aux exigences spécifiées. Cela contribue à assurer la sécurité de l’approvisionnement en eau potable et à minimiser les risques pour la santé publique. Dans ce modèle, il existe deux services contextuels (service de détection des composants d’eau , système intelligent ). Chaque service a plusieurs opérations. (voir la figure 4.5)

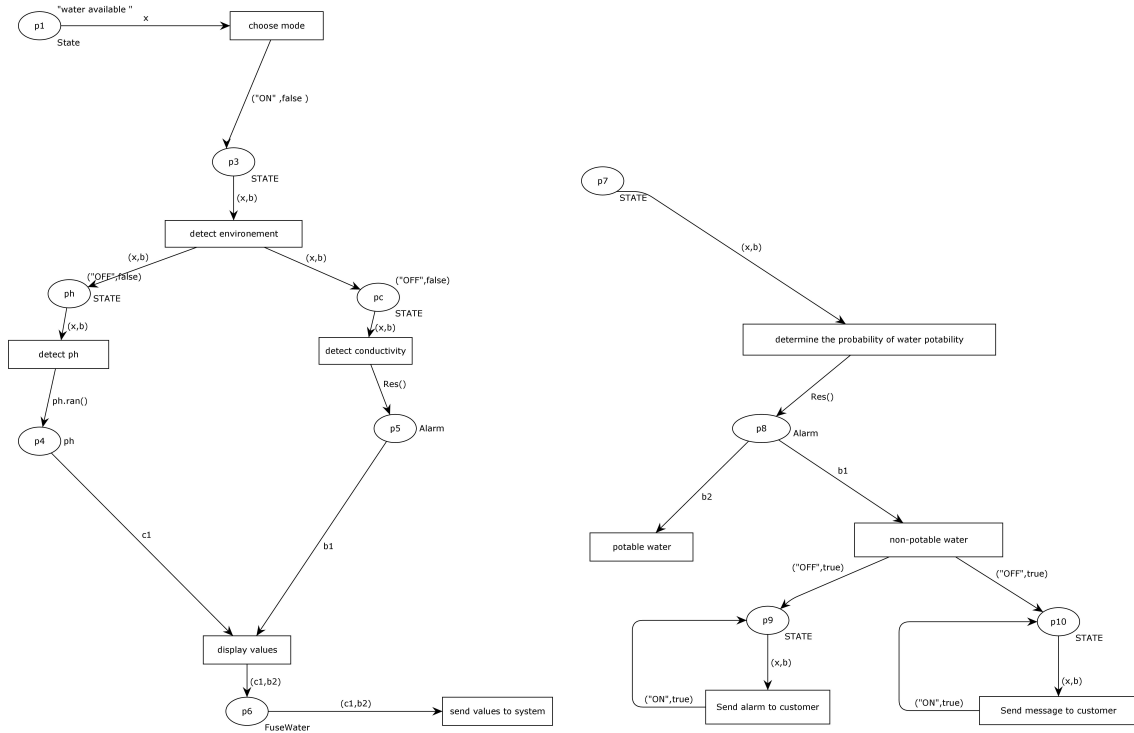


FIGURE 4.5 – le modèle de système

### 4.6.3 les couleurs utilisés dans ce modèle

La figure 4.6 présente les ensembles de couleurs utilisés dans ce modèle. Chaque place est associée à un jeu de couleurs qui représente une information contextuelle spécifique. Le jeu de couleurs "State" est utilisé pour représenter l'état du client. Les informations contextuelles du système et des ressources sont également représentées par le jeu de couleurs "State".

```

▼ colset State= string;
▼ colset Alarm=bool;
▼ colset ph=int with 7..14;
  ▼ colset STATE = product State*Alarm ;
  ▼ block
    ▼ var x:State;
    ▼ colset S= int with 0..1;
    ▼ colset FuseWater=product ph*Alarm;
    ▼ fun Res()=
      if S.ran()=0
      then false
      else true;
    ▼ var b,b1,b2:Alarm;
    ▼ var c,c1,c2:ph;
  
```

FIGURE 4.6 – Ensembles de couleurs du modèle de scénario du système

Places	Description
P1	Le client
P3	Système de détection des composants d'eau
P7	Système de surveillance de l'eau potable
Ph	Capteur de pH
Pc	Capteur de conductivité électrique
P4	pH
P5	La conductivité électrique
P6	Informations fusionnées du système de détection des composants de l'eau
P8	Traitement des données
P9	Envoi d'alarme au client
P10	Envoi d'un message au client

TABLE 4.1 – Les places de la figure

## 4.7 l'utilisation d'intelligence artificielle dans le système :

La surveillance précise et proactive de la qualité de l'eau est rendue possible par l'utilisation de l'intelligence artificielle (IA) dans le système intelligent de l'eau potable. Grâce à l'IA, le système est capable de collecter, d'analyser et d'interpréter en temps réel des quantités massives de données provenant de capteurs placés sur le réseau de distribution d'eau. La capacité de l'IA à repérer des schémas et des anomalies dans les données recueillies est l'un de ses principaux avantages. Les algorithmes qui utilisent l'apprentissage automatique peuvent évaluer les données historiques pour repérer les schémas, les fluctuations saisonnières et les relations entre les différents indicateurs de la qualité de l'eau. Cela permet de définir des seuils de qualité appropriés et de détecter rapidement tout écart par rapport à ces seuils. En outre, l'IA améliore la précision des prévisions. Les systèmes intelligents peuvent prévoir les changements dans la qualité de l'eau et prendre des mesures préventives pour éviter les problèmes futurs en évaluant les données en temps réel et en les comparant aux modèles prédictifs. L'IA facilite également la détection des anomalies et des contaminations dans l'eau potable. Les algorithmes de détection des anomalies peuvent repérer des tendances particulières ou des variations notables dans les paramètres de l'eau, qui peuvent indiquer la présence de contaminants ou de problèmes de qualité. Les problèmes peuvent ainsi être identifiés immédiatement et des solutions peuvent être mises en œuvre pour préserver la sécurité de l'eau potable.

## 4.8 Conclusion

L'étude de cas sur le système intelligent de l'eau potable a démontré l'importance et les avantages d'utiliser des technologies avancées telles que l'intelligence artificielle, l'Internet des objets et les capteurs connectés pour assurer une surveillance continue et précise de la qualité de l'eau potable. L'étude de cas a également mis en évidence l'utilisation de l'UML pour la modélisation et les réseaux de Pétri pour la vérification du système. Les réseaux de Pétri colorés offrent une représentation formelle des interactions et des comportements du système, permettant une analyse approfondie de la faisabilité de système. Le système intelligent de l'eau potable est une solution prometteuse pour garantir la qualité de l'eau potable. En utilisant les avancées technologiques telles que l'IA, l'IoT et les capteurs connectés, il permet une surveillance proactive, une détection précoce des problèmes et une optimisation des opérations. L'étude de cas souligne l'importance de ces systèmes intelligents pour assurer la sécurité, la santé et le bien-être des consommateurs d'eau potable.

## 4.9 Conclusion générale

Notre projet se concentre sur l'application de techniques de vérification formelle pour évaluer la fiabilité des systèmes intelligents conçus pour surveiller la qualité de l'eau potable. Le projet utilise des réseaux de Petri colorés comme outil de modélisation pour représenter et analyser le comportement de ces systèmes.

Les réseaux de Petri colorés fournissent un cadre formel et visuel pour décrire l'état, les événements et les interactions d'un système. En modélisant le système de surveillance de l'eau potable à l'aide de réseaux de Petri colorés, diverses propriétés et comportements du système peuvent être vérifiés notamment la fiabilité de système.

L'objectif principal du projet est d'évaluer la fiabilité des systèmes intelligents conçus pour surveiller la qualité de l'eau potable. Le projet vise à atteindre cet objectif par les moyens suivants :

- **Développement d'un modèle** : Élaborer un modèle détaillé et précis du système intelligent de surveillance de l'eau potable à l'aide de réseaux de Petri colorés. Ce modèle doit capturer les composants essentiels, les états et les interactions du système.
- **Spécification des propriétés** : Définir les propriétés souhaitées et les exigences auxquelles le système doit satisfaire, telles que la détection des anomalies dans l'eau.
- **Vérification formelle** : Appliquer des techniques de vérification formelle, telles que la vérification de modèle pour analyser le modèle de réseau de Petri coloré et vérifier les propriétés spécifiées. Il s'agit de vérifier systématiquement le modèle par rapport aux propriétés souhaitées afin de s'assurer de leur validité et d'identifier toute violation ou insuffisance potentielle.
- **Analyse des résultats** : Analyser les résultats de la vérification pour évaluer la fiabilité du système de surveillance intelligent.

Ce projet revêt une grande importance pour les raisons suivantes : Premièrement, il vise à améliorer la surveillance de la qualité de l'eau en développant une approche de vérification formelle pour les systèmes intelligents. En garantissant la fiabilité de ces systèmes, le projet contribue à préserver la santé publique et à assurer l'accès à l'eau potable.

Deuxièmement, le projet se concentre sur la vérification de la fiabilité du système de surveillance intelligent. Grâce à l'utilisation de techniques de vérification formelle, il permet d'identifier les défauts de conception, les erreurs du système. Ce processus de vérification améliore la fiabilité, la sécurité et les performances globales du système.

En conclusion, l'importance du projet réside dans sa contribution à la fiabilité des systèmes intelligents de surveillance de l'eau potable. Grâce à la vérification formelle, il améliore les processus de surveillance de la qualité de l'eau, soutient les pratiques de gestion durable de l'eau et fait progresser la technologie dans ce domaine.

# Bibliographie

- [1] Karen Rose, Scott Eldridge, and Lyman Chapin. The internet of things : An overview. *The internet society (ISOC)*, 80 :1–50, 2015.
- [2] What is iot? <https://www.oracle.com/internet-of-things/what-is-iot/>. [Consulté le 24 mai 2023].
- [3] Harald Sundmaeker, Patrick Guillemin, Peter Friess, Sylvie Woelfflé, et al. Vision and challenges for realising the internet of things. *Cluster of European research projects on the internet of things, European Commission*, 3(3) :34–36, 2010.
- [4] Jayavardhana Gubbi, Rajkumar Buyya, Slaven Marusic, and Marimuthu Palaniswami. Internet of things (iot) : A vision, architectural elements, and future directions. *Future generation computer systems*, 29(7) :1645–1660, 2013.
- [5] V Dankan Gowda, SB Sridhara, KB Naveen, M Ramesha, and G Naveena Pai. Internet of things : Internet revolution, impact, technology road map and features. *Adv. Math. Sci. J*, 9(7) :4405–4414, 2020.
- [6] Keyur K Patel, Sunil M Patel, and P Scholar. Internet of things-iot : definition, characteristics, architecture, enabling technologies, application & future challenges. *International journal of engineering science and computing*, 6(5), 2016.
- [7] Vladislavs Aleksandrovičs, Eduards Filičevs, and Jānis Kam-pars. Internet of things : structure, features and management, 2016.
- [8] Lu Tan and Neng Wang. Future internet : The internet of things. In *2010 3rd international conference on advanced computer theory and engineering (ICACTE)*, volume 5, pages V5–376. IEEE, 2010.

- [9] Keyur K Patel, Sunil M Patel, and P Scholar. Internet of things-iot : definition, characteristics, architecture, enabling technologies, application & future challenges. *International journal of engineering science and computing*, 6(5), 2016.
- [10] De-Li Yang, Feng Liu, and Yi-Duo Liang. A survey of the internet of things. In *Proceedings of the 1st International Conference on E-Business Intelligence (ICEBI 2010)*, 2010/12.
- [11] Eleonora Borgia. The internet of things vision : Key features, applications and open issues. *Computer Communications*, 54 :1–31, 2014.
- [12] Abhishek Khanna and Sanmeet Kaur. Internet of things (iot), applications and challenges : a comprehensive review. *Wireless Personal Communications*, 114 :1687–1762, 2020.
- [13] Shashank Agrawal and Dario Vieira. A survey on internet of things. *Abakós*, 1(2) :78–95, 2013.
- [14] D Jeya Mala. *Integrating the Internet of Things into software engineering practices*. IGI Global, 2019.
- [15] A Spiteri Staines. Some fundamental properties of petri nets. *International Journal of Electronics Communication and Computer Engineering, IJECCE*, 4(3) :1103–1109, 2013.
- [16] Weng Jie Thong and MA Aamedeen. A survey of petri net tools. In *Advanced Computer and Communication Engineering Technology : Proceedings of the 1st International Conference on Communication and Computer Engineering*, pages 537–551. Springer, 2015.
- [17] Gajendra Pratap Singh. Basic properties of petri nets. *SRMS Journal of Mathematical Science*, 1(01) :54–71, 2014.
- [18] Yang Xu and Xiaoyao Xie. Modeling and analysis of security protocols using colored petri nets. *J. Comput.*, 6(1) :19–27, 2011.
- [19] Alireza Souri and Monire Norouzi. A state-of-the-art survey on formal verification of the internet of things applications. *Journal of Service Science Research*, 11(1) :47–67, 2019.
- [20] Anne Vinter Ratzner, Lisa Wells, Henry Michael Lassen, Mads Laursen, Jacob Frank Qvortrup, Martin Stig Stissing, Michael Westergaard, Søren Christensen, and Kurt Jensen. Cpn tools for editing, simulating, and analysing coloured petri nets. In *Applications and Theory of Petri Nets 2003 : 24th International Confe-*

- rence, ICATPN 2003 Eindhoven, The Netherlands, June 23–27, 2003 Proceedings, pages 450–462. Springer, 2003.
- [21] Xiaopeng Niu and Zhiliang Wang. A smart home context-aware model based on uml and colored petri net. *International Journal of Smart Home*, 10(1) :101–114, 2016.
- [22] Jie Sun, Yongping Zhang, and Jianbo Fan. A petri-net based context representation in smart car environment. *International Journal of Handheld Computing Research (IJHCR)*, 2(2) :34–46, 2011.
- [23] MD Harrison, JL Silva, OR Ribeiro, JM Fernandes, and JC Campos. The apex framework : prototyping of ubiquitous environments based on petri nets. In *Human-Centred Software Engineering : Third International Conference (HCSE)*. Newcastle University, 2010.
- [24] Houda Haiouni and Ramdane Maamri. Context-aware automatic service selection mechanism for ambient intelligent environments. In *Ambient Intelligence-Software and Applications : 5th International Symposium on Ambient Intelligence*, pages 1–11. Springer, 2014.
- [25] Oh Byung Kwon. Modeling and generating context-aware agent-based applications with amended colored petri nets. *Expert Systems with Applications*, 27(4) :609–621, 2004.
- [26] Seungwok Han and Hee Yong Youn. Modeling and analysis of time-critical context-aware service using extended interval timed colored petri nets. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A : Systems and Humans*, 42(3) :630–640, 2011.
- [27] Zhifang Hu, Tao Lu, and Zhuo Zhao. Context-aware service system modeling using timed cpn. In *2013 10th International Conference on Service Systems and Service Management*, pages 164–169. IEEE, 2013.
- [28] Patrick Reignier, Oliver Brdiczka, Dominique Vaufreydaz, James L Crowley, and Jérôme Maisonnasse. Context-aware environments : from specification to implementation. *Expert systems*, 24(5) :305–320, 2007.

# Annexe **A**

## Description des cas d'utilisation

<b>Cas d'utilisation N°1</b>	Détecter les données
<b>L'objectif</b>	Surveiller l'état de l'environnement : les capteurs peuvent être utilisés pour mesurer la qualité de l'eau.
<b>Niveau d'application</b>	Niveau environnemental
<b>Acteurs principaux et secondaires</b>	Acteur principal : capteur Acteurs secondaires : Capteur de minéralisation, Capteur de Escherichia coli, Capteur de Chlorure, Capteur de Sulfate, Capteur de Calcium, Capteur de Magnésium, Capteur de goût, Capteur de l'odeur, Capteur de nitrate, Capteur de Bicarbonate, Capteur de pH, Capteur de la conductivité électrique
<b>Déclencheur</b>	Disponibilité de l'eau du robinet
<b>Parties prenantes et intérêts</b>	Opérateurs du système, Utilisateurs finaux, Gestionnaires de système
<b>Préconditions</b>	Le capteur est disponible et fonctionnel
<b>Postconditions avec succès</b>	Les résultats de la détection des données sont stockés dans le cloud
<b>Postconditions en cas d'échec</b>	Les résultats de la détection des informations ne sont pas stockés dans le cloud
<b>Cas d'utilisation description</b>	L'utilisation de capteurs pour collecter des données à partir de l'environnement physique et analyser ces données pour détecter des informations utiles
<b>Description alternative</b>	Si un capteur ne fonctionne pas correctement, les données collectées peuvent être incorrectes ou manquantes. Si les données collectées sont incomplètes, l'utilisateur ne peut pas détecter les informations
<b>Exceptions</b>	Les capteurs ne fonctionnent pas correctement et ne collectent pas de données
<b>Relations entre les cas d'utilisation</b>	Héritage des capteurs de minéralisation, Escherichia coli, Chlorure, Sulfate, Calcium, Magnésium, goût, odeur, nitrate, Bicarbonate, pH, conductivité électrique

TABLE A.1 – Détecter les données

<b>Cas d'utilisation N° 2</b>	Surveillance à distance des capteurs
<b>L'objectif</b>	Permettre de surveiller à distance les nœuds connectés à un réseau sans fil
<b>Niveau d'application</b>	Niveau environnemental
<b>Acteurs principaux</b>	Noeud
<b>Acteurs secondaires</b>	Wifi, Zigbee, Bluetooth
<b>Déclencheur</b>	Mise en place de nouveaux capteurs connectés à un réseau sans fil ou ajout de nouveaux utilisateurs autorisés à surveiller les capteurs à distance
<b>Parties prenantes et intérêts</b>	- Les opérateurs de capteurs - Les responsables de la maintenance
<b>Préconditions</b>	- Les capteurs sont connectés à un réseau sans fil - Les capteurs sont configurés pour envoyer des données sur le réseau
<b>Postconditions avec succès</b>	L'utilisateur peut collecter des données à distance à partir des capteurs connectés au réseau sans fil
<b>Postconditions en cas d'échec</b>	L'utilisateur ne peut pas collecter des données à distance à partir des capteurs connectés au réseau sans fil
<b>Cas d'utilisation description</b>	Permet à un utilisateur de surveiller à distance des capteurs connectés à un réseau sans fil, afin de collecter des données et de détecter des anomalies
<b>Description alternative</b>	Si le réseau sans fil est indisponible, l'utilisateur ne peut pas accéder aux données des capteurs
<b>Exceptions</b>	Si un capteur ne fonctionne pas correctement, les données collectées peuvent être incorrectes ou manquantes
<b>Relations entre les cas d'utilisation</b>	- Héritage : Wifi, Zigbee, Bluetooth

TABLE A.2 – Surveillance à distance des capteurs

<b>Cas d'utilisation N°3</b>	Stockage et traitement des données
<b>L'objectif</b>	Stocker les données collectées par les capteurs de l'IoT pour un accès facile et une analyse ultérieure
<b>Niveau d'application</b>	Niveau du Cloud
<b>Acteurs principaux et secondaires</b>	Acteur principal : Cloud Acteurs secondaires : IBM, Google, AWS
<b>Déclencheur</b>	Le capteur détecte les données et les envoie vers le cloud
<b>Parties prenantes et intérêts</b>	- Acteur Cloud - Gestionnaire de système
<b>Préconditions</b>	- Connexion réseau stable et fiable - Disponibilité du cloud
<b>Postconditions avec succès</b>	- Les clients du système intelligent d'eau potable reçoivent les alertes pertinentes en temps opportun
<b>Postconditions en cas d'échec</b>	- Les clients du système intelligent d'eau potable ne reçoivent pas les alertes
<b>Cas d'utilisation description</b>	Décrit le processus d'alerte des clients du système intelligent d'eau potable en cas de problème ou d'urgence
<b>Description alternative</b>	- Si l'envoi des alertes aux clients échoue
<b>Exceptions</b>	- Problème de connectivité : Si le système intelligent d'eau potable rencontre un problème de connectivité qui empêche l'envoi des alertes
<b>Relations entre les cas d'utilisation</b>	Héritage : IBM, Google, AWS

TABLE A.3 – Stockage et traitement des données

<b>Cas d'utilisation N°4</b>	Sécurité
<b>L'objectif</b>	Garantir la sécurité des données du système intelligent dans le contexte du Cloud
<b>Niveau d'application</b>	Niveau du Cloud
<b>Acteurs principaux et secondaires</b>	Acteur principal : Cloud Acteurs secondaires : IBM, Google, AWS
<b>Déclencheur</b>	- La nécessité de garantir la confidentialité des données stockées et traitées dans le Cloud - La nécessité de garantir l'intégrité des données
<b>Parties prenantes et intérêts</b>	- Acteur Cloud - Gestionnaire de système
<b>Préconditions</b>	- La mise en place de l'authentification et de l'autorisation des utilisateurs
<b>Postconditions avec succès</b>	- Les données stockées et traitées dans le Cloud sont sécurisées et protégées
<b>Postconditions en cas d'échec</b>	- Les données stockées et traitées dans le Cloud sont exposées à des risques de sécurité
<b>Cas d'utilisation description</b>	Décrit le processus de mise en œuvre des mesures de sécurité dans le Cloud
<b>Description alternative</b>	- Détection d'une activité suspecte
<b>Exceptions</b>	- Attaque de sécurité : Si le Cloud est victime d'une attaque
<b>Relations entre les cas d'utilisation</b>	Héritage : IBM, Google, AWS

TABLE A.4 – Sécurité

<b>Cas d'utilisation N°5</b>	Inscription
<b>L'objectif</b>	Permettre aux clients de s'inscrire dans le système
<b>Niveau d'application</b>	Un niveau d'application
<b>Acteurs principaux et secondaires</b>	Principale : Client Secondaire : Gestionnaire de système
<b>Déclencheur</b>	C'est l'action d'un client qui souhaite s'inscrire dans le système
<b>Parties prenantes et intérêts</b>	- Les clients - Les propriétaires de système IoT
<b>Préconditions</b>	- Le système IoT doit être disponible et fonctionnel - Le client doit avoir accès à un navigateur web ou à une application mobile
<b>Postconditions avec succès</b>	- Le client a réussi à soumettre le formulaire d'inscription avec succès
<b>Postconditions en cas d'échec</b>	- Le formulaire d'inscription n'a pas été soumis avec succès
<b>Cas d'utilisation description</b>	Processus par lequel les clients potentiels peuvent créer un compte dans le système IoT en fournissant des informations d'inscription
<b>Description alternative</b>	- Si le client ne souhaite pas fournir toutes les informations d'inscription demandées
<b>Exceptions</b>	- Si un client tente de s'inscrire avec des informations déjà existantes dans le système
<b>Relations entre les cas d'utilisation</b>	Héritage : Gestionnaire de système

TABLE A.5 – Inscription

<b>Cas d'utilisation N°6</b>	Connection
<b>L'objectif</b>	Permettre aux clients du système IoT de s'authentifier auprès du système pour accéder aux fonctionnalités disponibles
<b>Niveau d'application</b>	Un niveau de connexion
<b>Acteurs principaux et secondaires</b>	Principale : Client Secondaire : Gestionnaire de système
<b>Déclencheur</b>	L'utilisateur lance l'application mobile du système IoT et clique sur le bouton "connexion"
<b>Parties prenantes et intérêts</b>	- Les clients - Les propriétaires de système IoT
<b>Préconditions</b>	- L'appareil du client dispose d'une connectivité Wi-Fi ou Bluetooth - Le système IoT est en ligne et disponible pour la connexion des clients
<b>Postconditions avec succès</b>	- Le client est connecté avec succès au système IoT - Les informations d'identification du client sont stockées dans le cloud
<b>Postconditions en cas d'échec</b>	- Le client n'est pas connecté avec succès au système IoT - Les informations d'identification du client ne sont pas stockées dans le cloud
<b>Cas d'utilisation description</b>	Il permet aux utilisateurs d'accéder aux fonctionnalités du système et de collecter des données à partir de capteurs
<b>Description alternative</b>	Échec de la connexion
<b>Exceptions</b>	- Les informations d'identification de l'utilisateur sont invalides
<b>Relations entre les cas d'utilisation</b>	Héritage : Gestionnaire de système

TABLE A.6 – Connection

<b>Cas d'utilisation N°7</b>	Payer l'abonnement
<b>L'objectif</b>	permettre au client de procéder au paiement de son abonnement afin d'accéder aux services
<b>Niveau d'application</b>	au niveau de l'interaction
<b>Acteurs principaux et secondaires</b>	Principale : Client Secondaire : Gestionnaire de système
<b>Déclencheur</b>	lorsque le client souhaite payer son abonnement pour continuer à bénéficier des services
<b>Parties prenantes et intérêts</b>	- Les clients - service de paiement
<b>Préconditions</b>	- Le client doit disposer d'un moyen de paiement valide, tel qu'une carte de crédit ou un compte bancaire.
<b>Postconditions avec succès</b>	- Le paiement de l'abonnement est effectué avec succès.
<b>Postconditions en cas d'échec</b>	- Le paiement de l'abonnement échoue - Le statut de l'abonnement reste inchangé en tant que "non payé".
<b>Cas d'utilisation description</b>	Ce cas d'utilisation décrit le processus de paiement de l'abonnement par un client.
<b>Description alternative</b>	- Moyen de paiement invalide -Échec du paiement
<b>Exceptions</b>	- carte invalide -compte invalide
<b>Relations entre les cas d'utilisation</b>	Héritage : Gestionnaire de système

TABLE A.7 – Payement

<b>Cas d'utilisation N°8</b>	Envoyer les données à l'hôpital
<b>L'objectif</b>	L'objectif principal de ce cas d'utilisation est de transmettre les données de détection à un hôpital ou à un laboratoire pour une évaluation médicale plus approfondie.
<b>Niveau d'application</b>	Niveau environnemental
<b>Acteurs principaux et secondaires</b>	Principale : Capteur de Escherichia colie
<b>Déclencheur</b>	détecter la présence de la bactérie Escherichia coli (E. coli) dans un échantillon.
<b>Parties prenantes et intérêts</b>	- Patients - Médecins et microbiologistes -Hôpitaux et laboratoires
<b>Préconditions</b>	-Le capteur Escherichia coli est fonctionnel et prêt à effectuer une détection -Un échantillon contenant potentiellement Escherichia coli est disponible.
<b>Postconditions avec succès</b>	- Les données de détection d'Escherichia coli sont transmises à l'hôpital de manière sécurisée. -L'hôpital reçoit les données et les intègre dans son système d'information médicale.
<b>Postconditions en cas d'échec</b>	- Les données de détection d'Escherichia coli ne sont pas transmises à l'hôpital -L'hôpital ne reçoit pas les données et n'est pas en mesure de les évaluer pour des décisions médicales.
<b>Cas d'utilisation description</b>	Ce cas d'utilisation décrit le processus d'envoi des données de détection d'Escherichia coli d'un capteur à un hôpital pour une évaluation médicale.
<b>Description alternative</b>	- -Échec de la connexion -Échec de la détection
<b>Exceptions</b>	-Problème de sécurité : Si la connexion entre le capteur et l'hôpital est compromise

TABLE A.8 – Envoyer les données à l'hôpital

<b>Cas d'utilisation N°9</b>	Alerte les clients
<b>L'objectif</b>	permettre une réponse rapide et efficace en cas d'urgence ou de situation critique en utilisant une alarme sonore distinctive qui attire l'attention des personnes présentes sur les lieux
<b>Niveau d'application</b>	Niveau environnemental
<b>Acteurs principaux et secondaires</b>	Principale : Alarm
<b>Déclencheur</b>	La détection d'un problème dans le système d'eau potable, tel qu'une contamination
<b>Parties prenantes et intérêts</b>	- Client
<b>Préconditions</b>	- Le système de surveillance est opérationnel -L'alarme est correctement configurée et connectée au système de surveillance.
<b>Postconditions avec succès</b>	- L'utilisateur est alerté de la situation anormale à l'aide de l'alarme.
<b>Postconditions en cas d'échec</b>	- L'utilisateur peut ne pas être alerté de la situation anormale à l'aide de l'alarme.
<b>Cas d'utilisation description</b>	-décrit le processus d'alerte des clients du système intelligent d'eau potable en cas de problème ou d'urgence
<b>Description alternative</b>	-Si l'alarme ne fonctionne pas correctement, l'utilisateur peut ne pas être averti de l'événement important.
<b>Exceptions</b>	-Problème de connectivité : Si le système intelligent d'eau potable rencontre un problème de connectivité qui empêche l'envoi des alertes

TABLE A.9 – Alerte les clients

<b>Cas d'utilisation N°10</b>	Envoyer le dataset à la direction des eaux
<b>L'objectif</b>	L'objectif principal de ce cas d'utilisation est d'informer la direction des eaux sur la qualité d'eau Dans n'importe quel région
<b>Niveau d'application</b>	Niveau de système de gestion
<b>Acteurs principaux et secondaires</b>	Principale :Gestionnaire de système - La direction des eaux
<b>Déclencheur</b>	-Anomalie échantillonnage eau
<b>Parties prenantes et intérêts</b>	-Gestionnaire de système -La direction des eaux
<b>Préconditions</b>	- Le système de surveillance est opérationnel -L'alarme est correctement configurée et connectée au système de surveillance.
<b>Postconditions avec succès</b>	-Le gestionnaire de système envoie avec succès le dataset à la direction des eaux
<b>Postconditions en cas d'échec</b>	- Le dataset ne envoyés pas ou la direction des eaux ne reçus pas
<b>Cas d'utilisation description</b>	- Ce cas d'utilisation décrit le processus d'envoi le dataset au l'algérien des eaux pour informer sur la qualité de l'eau potable dans la région
<b>Description alternative</b>	- Si le système rencontre des problèmes techniques lors de l'envoi de dataset
<b>Exceptions</b>	-Erreur d'envoi de message -Si la direction des eaux ne répond pas au message

TABLE A.10 – Envoyer le dataset à la direction des eaux