République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Yahia Fares de Médéa



Faculté des Sciences

Mémoire de fin d'études de Master

Filière: Informatique

Spécialité: Ingénierie des systèmes et technologies du web

Utilisation de jumeaux numériques pour la vérification à l'exécution des systèmes cyber-physiques

---

Présenté par

Abdennour BERKANI

Elmahdi BOUKENDAKDJI

Propose et Dirige par

Dr. RAHIM MESSAOUD

Remerciement

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude aux personnesqui ont joué un rôle central dans la réussite de cette thèse et qui ont joué un rôle déterminant dans mon parcours académique.

D'abord et avant tout, nous aimerions exprimer notre profonde gratitude à notre conseiller de thèse, **Dr. Rahim MESSAOUD**. Leurs conseils exceptionnels, leur soutien inébranlable et leur expertise profonde ont façonné cette recherche et ont été inestimables tout aulong du processus.

Nous tenons également à remercier les membres du jury pourleur temps, leurs efforts et leur expertise dans l'évaluation de cette thèse. Nous apprécions sincèrement leurs commentaires constructifs, leurs idées précieuses et leur évaluation critique.

Nous sommes profondément reconnaissants à notre famille pourleur amour inconditionnel, leurs encouragements et leur croyance continue en nos capacités.

Enfin, nous tenons à remercier sincèrement toutes les personnesqui nous ont soutenus, que ce soit par leurs aimables paroles, leurs encouragements ou leur compréhension. Votre croyance en noscapacités et votre présence dans nos vies ont été une source d'inspiration et de motivation.

Dédicace

Je dédie ce travail :

À ALLAH Tout-Puissant qui ouvre mon esprit devant mes yeux pour me guider, éclairer mon cœur, et me montrer clairement le bon chemin pour que je le suive, et me montrer clairement le mauvais chemin pour que je l'évite.

À la personne qui est la source d'inspiration, de sagesse, de connaissance,de compréhension, de miséricorde, de paix et à la personne qui encourage les gens à être patients, notre Prophète Mohammad.

À mes chers parents, dont l'amour inconditionnel, les sacrifices et la croyance inébranlable en mes capacités ont été la pierre angulaire de mon succès. Votre présence inébranlable, vos encouragements et vos sacrifices sans fin m'ont fait la personne que je suis aujourd'hui.

À ma famille bien-aimée, avec qui j'ai partagé d'innombrables jours et nuits remplis de joie, de rires, de larmes et de moments doux-amers. Votre amour constant, votre soutien et votre présence durable ont été le fondement de ma force et de ma résilience.

À mes amis incroyables (je ne peux pas vous mentionner tous ici, mais chacun d'entre vous connaît la place spéciale que vous tenez dans mon cœur), qui ont été mes compagnons constants dans ce voyage remarquable. Des moments de joie aux moments difficiles, nous nous sommes tenus ensemble, créant des souvenirs qui occuperont à jamais une place spéciale dans mon cœur.

"Mon amour pour vous tous ne peut jamais être quantifié. Que Dieu vous bénisse tous"

Abdennour Berkani.

Dédicace

Je dédie cette thèse :

À mes chers parents et à toute ma famille pour leurs sacrifices,leur amour, leur affection et leur soutien tout au long de mes études.

À Mes chers amis, qu'ils soient proches ou lointains, pourleurs encouragements constants et leur soutien moral.

À tous ceux qui m'aiment."Je vous remercie tous."

ElMahdi Boukendakdji.

Résumé

Ce mémoire propose une démarche innovante pour la vérification dynamique (à l'exécution) des systèmes cyber-physiques (CPS) en utilisant des jumeaux numériques. La méthode consiste à créer des répliques virtuelles des CPS, permettant une surveillance continue et la détection d'anomalies afin de notifier les utilisateurs et 'éviter des risques opérationnels des systèmes physiques. Les jumeaux numériques sont utilisés pour tester des scénarios, optimiser les configurations et réagir rapidement aux incidents. L'application pratique montre une amélioration de la sécurité et de la résilience des CPS. Cette approche ouvre de nouvelles perspectives pour la gestion proactive des systèmes complexes.

Mots-clés : Systèmes cyber-physiques, Vérification à l'exécution, contraintes, Jumeaux Numériques

Abstract

This master thesis proposes an innovative approach for the run-time verification of cyber-physical systems (CPS) using digital twins. The method consists of creating virtual replicas of CPS, allowing continuous monitoring and detection of anomalies for avoiding operational risks induced by physical systems. Digital twins are used to test scenarios, optimize configurations and react quickly to incidents. The practical application shows an improvement in the security and resilience of CPS. This approach opens up new opportunities for the proactive management of complex systems.

Keywords: Cyber-Physical Systems, run-time verification, constraints, Twins Digital (DT)

ملخص

يقترح هذا البحث منهجًا مبتكرًا للتحقق الديناميكي (أثناء التنفيذ) من الأنظمة السيبرانية الفيزيائية (CPS) باستخدام التوائم الرقمية. تتضمن الطريقة إنشاء نسخ افتراضية من CPS، مما يسمح بالمراقبة المستمرة والكشف عن الشذوذ لإخطار المستخدمين وتجنب المخاطر التشغيلية للأنظمة الفيزيائية. تُستخدم التوائم الرقمية لاختبار السيناريوهات، تحسين التكوينات، والاستجابة السريعة للحوادث. تظهر التطبيقات العملية تحسنًا في الأمان والمرونة للأنظمة السيبرانية الفيزيائية. يفتح هذا النهج آفاقًا جديدة لإدارة الأنظمة المعقدة بشكل استباقي.

الكلمات المفتاحية :الأنظمة السيبرانية الفيزيائية، التحقق أثناء التنفيذ، القيود، التوائم الرقمية (DT)

Table des matières

I Chapitre I : Systèmes cyber-physiques et jumeaux numériques 4

I.1 Introduction 5

I.2 Internet des Objets (IoT) 5

I.3 Protocoles de couche d'application IoT 6

I.4 Les Éléments Fonctionnels de l'IoT 7

I.4.1 Appareils 7

I.5 Les Avantages de l'IoT 8

I.6 Système à Base d'IoT 8

I.7 Systèmes Cyber-Physiques (CPS) 8

I.8 Jumeau numériques (Digital twins) 9

I.8.1 Les avantages jumeaux numériques : 11

I.8.2 Limitations et Défis des Jumeaux Numériques 13

I.9 Création et Utilisation de Jumeaux Numériques avec Eclips Ditto 14

I.9.1 Eclipse ditto 14

I.10 Transformations Industrielles et Urbaines grâce aux Jumeaux Numériques d'IBM :. 15

I.11 Conclusion 16

II Chapitre II : Vérification des systèmes 18

II.1 Introduction 19

II.2 Technique vérification 19

II.2.1 Vérification basée sur les modèles 19

II.2.2 Vérification au moment de l'exécution *22*

II.2.2.1 Surveillance Passive 22

II.2.2.2 Surveillance Active 22

II.3 Technique de vérification a l'exécution 22

II.4 Les avantage de vérification 23

II.5 Mise en œuvre de la vérification à l'exécution 24

II.6 Vérification des systèmes cyber-physiques 25

II.7 Conclusion 26

III Chapitre III : Conception 28

III.1 Introduction 29

III.2 Idée Générale 29

III.3 Jumeaux numériques pour la vérification des systèmes cyber-physiques (CPS) 35

III.3.1 Définition des contraintes 38

III.4 Conclusion : 41

IV Chapitre IV : Implémentation 42

IV.1 Introduction 43

IV.2 La structure globale avec des jumeaux numériques *43*
IV.2.1 Environnement et outils de développement **44**
IV.3 Création d'un Jumeau Numérique pour les CPS *46*
IV.4 Web application *48*
IV.5 Définition des contraintes *50*
IV.6 Vérification des contraintes *51*
IV.7 Conclusion *53*
Conclusion générale **54**
Les références bibliographiques **56**
II. Références **57**

Liste des figures

Figure 1:définition internet des objets.....6
Figure 2:Modèle du système. 7
Figure 3:jumeaux numériques.....11
Figure 4:Ditto architecture.....15
Figure 5: Modèle du système.....22
Figure 6:Vérification de CPS.....26
Figure 7:L'architecture proposée 32
Figure 8: Diagramme block SYSML 33
Figure 9:créations de jumeau numérique 34
Figure 10: Diagramme de cas d'utilisation.....38
Figure 11:diagramme de séquence définition des contraintes 39
Figure 12:diagramme de séquence vérification des contraintes 40
Figure 13:liste des choses 44
Figure 14:fonctionnalité de ditto.....45
Figure 15:interface docker.....45
Figure 16:liste choses dans Postman.....46
Figure 17:la forme de json.....48
Figure 18:interface de login.....49
Figure 19:interface d'application 50
Figure 20: Ajouter une contrainte 51
Figure 21:vérification des contraintes.....52
Figure 22:les résultats de vérification 52

Liste des abréviations et acronymes

Ai.	artifical intelligence
API.	Application programming
interfacesCC	Controlling components
Cps	Cyber physical systems
CSS.	Casading style sheets
DT	Digitaltwin
ER.	Emergency reponse
GUI.	Raphical user
HMI	Interface Human-machine
HTTP	Hypertext transfer protocol
IDS.	Intrusion detection systems
IOT	Internet of things
Json.	javascript object notation
OLAP	online analytical processing
OT/IT.	Operational technology / information technologyPT. Physical twin
PTC.	Physicalizing the cyber
Sql	structured query language
Uid.	unique identifier
MQTT	Message Queuing Telemetry Transport
CoAP	Constrained Application Protocol
AMQP	Advanced message queuing protocol

XMPP	Extensible message and presence protocol
VM.	Virtual machine
Wap	Wireless application protocol
Wms	warehouse management system
Xml.	extensible markup language

.

Introduction générale

Introduction générale

Avec l'avènement des systèmes cyber-physiques, où des systèmes informatiques interagissent étroitement avec le monde physique, la nécessité de disposer de modèles précis et fiables pour simuler le comportement en temps réel de ces systèmes est devenue primordiale. Les jumeaux numériques, qui sont des répliques virtuelles des systèmes physiques, ont émergé comme une solution prometteuse pour répondre à ce besoin croissant. Ces jumeaux numériques permettent une analyse détaillée du fonctionnement des systèmes, de la conception à la maintenance, en offrant une représentation virtuelle en temps réel de leurs comportements.

Les Systèmes Cyber-Physiques (CPS) représentent une intégration avancée de processus informatiques et physiques, permettant une interaction dynamique entre le monde numérique et le monde physique Cependant, un des défis majeurs concernant le bon fonctionnement de ces systèmes est de garantir que leurs comportements sont en concordance avec les exigences et les contraintes spécifiées. Ceci pourra être validé à travers l'utilisation des techniques de vérification. La vérification au moment de l'exécution consiste à vérifier si les contraintes de bon fonctionnement d'un système sont vérifiées et ceci durant son opération. La vérification au moment de l'exécution permet d'éviter des configurations non désirables qui peuvent causer de graves dégâts pour le système.

L'objectif de ce mémoire est de proposer une démarche permettant de procéder à la vérification au moment de l'exécution des systèmes cyber-physiques en se basant sur leurs jumeaux numériques. Ces derniers, en fournissant des réplicas numériques en temps réel peuvent servir comme modèle du système qui doit vérifier les exigences et les contraintes spécifiées.

Pour atteindre cet objectif, nous proposons dans ce mémoire une représentation en jumeaux numérique concernant les systèmes cyber-physiques. Cette représentation constituera le modèle de base pour la spécification des contraintes qui régissent le bon fonctionnement de système physique. Le jumeau numérique sera enrichi par un module de vérification de contraintes qui sera responsable de notifier et de tracer les résultats de vérification en temps réel. La capacité du jumeau numérique à répliquer le comportement du système physique est donc cruciale pour assurer cette vérification où la réactivité et la synchronisation sont essentielles.

Ce mémoire est organisé en quatre chapitres présentés successivement :

- Dans le premier chapitre, nous présentons les systèmes cyber-physiques, les jumeaux numériques et l'Internet des Objets.
- Dans le deuxième chapitre**,** nous présentons des notions concernant la vérification des systèmes, en mentionnant certaines des techniques utilisées, et nous abordons la vérification des systèmes cyber physiques.
- Le troisième chapitre détaille la conception de notre solution qui propose l'utilisation des jumeaux numériques pour vérifier des CPS et ainsi assurer une surveillance continue et en temps réels relative à la satisfaction des exigences du systèmes exprimée sous forme de contraintes opérationnelles.
- Le quatrième chapitre décrit la mise en œuvre pratique de notre solution, en soulignant les étapes de développement et en présentant l'application sur un cas d'étude concret pour démontrer l'efficacité de notre démarche de vérification.

Nous terminerons notre mémoire par une conclusion générale qui résume nos contributions et présente les perspectives permettant à améliorer notre travail.

I Chapitre I : Systèmes cyber-physiques et jumeaux numériques

I.1 Introduction

Les jumeaux numériques, souvent désignés comme les piliers de l'industrie 4.0, représentent une révolution dans le monde de la fabrication et de la gestion des systèmes complexes. Cette innovation technologique consiste en la création d'une réplique virtuelle précise d'un système physique, qu'il s'agisse d'une machine, d'un produit ou même d'une usine entière. Cette réplique numérique est constamment synchronisée avec son homologue physique, permettant ainsi une surveillance en temps réel, une analyse approfondie et une simulation avancée des opérations.

Les jumeaux numériques tirent parti des avancées en matière de technologies telles que l'internet des objets (IoT), les systèmes cyber-physiques (CPS), la modélisation assistée par ordinateur, la réalité virtuelle et augmentée, ainsi que l'intelligence artificielle. L'Internet des objets (IoT) fait référence à un réseau de dispositifs physiques intégrés avec des capteurs, des logiciels et d'autres technologies, connectés à Internet pour collecter et échanger des données. Les systèmes cyber-physiques (CPS) intègrent des éléments logiciels et matériels pour permettre une interaction et une coordination avancées entre les composants physiques et numériques, permettant une surveillance et un contrôle plus sophistiqués des systèmes complexes.

Ces outils permettent aux jumeaux numériques d'offrir une gamme diversifiée de services, allant de l'aide à la conception et à la fabrication à la maintenance prédictive et à l'optimisation des performances. En exploitant ces technologies de pointe, les jumeaux numériques sont en mesure de transformer les méthodes traditionnelles de gestion des systèmes complexes, ouvrant la voie à une ère de production et de gestion plus intelligente et plus efficace.

I.2 Internet des Objets (IoT)

Le monde des affaires et le monde universitaire se sont récemment beaucoup intéressés à l'IoT, principalement en raison des capacités qu'il offre. L'IoT crée un monde où tous les appareils intelligents et technologies sont connectés à Internet et capables de communiquer entre eux avec le moins d'intervention humaine possible. Malheureusement, il n'existe pas de définition consensuelle du terme "IoT", car les définitions sont introduites à partir de nombreuses interprétations et points de vue. Voici quelques définitions provenant de plusieurs chercheurs: [5].

1. **Définition I** : Les objets sont interconnectés et activement impliqués dans ce que l'on peut appeler l'Internet du futur [6].

2. **Définition II** : Il y a deux termes dans cette expression : Les objets se réfèrent à tous les dispositifs interconnectés à un réseau reposant sur des protocoles identiques, tandis que l'Internet est décrit comme le réseau global de nombreux réseaux [7].

3. **Définition III** : Le concept d'IoT est tout dispositif toujours accessible par n'importe qui, à tout moment, de n'importe où, via n'importe quelle application et sur n'importe quel réseau [6].

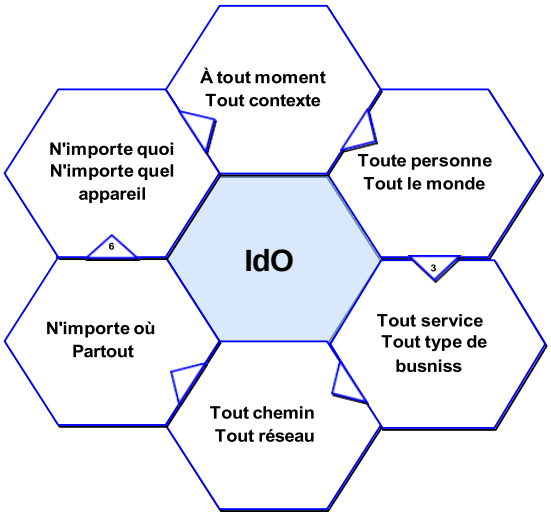


Figure 1:définition internet des objets

What is the Internet of Things (IoT)? | IBM

I.3 Protocoles de couche d'application IoT

1) Message Queue Telemetry Transport (MQTT):

Message Queue Telemetry Transport (MQTT) est un protocole de messagerie léger, publication-abonnement conçu pour les réseaux à faible bande passante, à latence élevée ou peu fiables. Il est largement utilisé dans les applications de l'Internet des objets (IoT) pour faciliter la communication entre les appareils.

2) Protocole d'application contraint (CoAP):

Le protocole d'application contraint (CoAP) est un protocole d'application Internet spécialisé conçu pour les appareils et les réseaux contraints, couramment utilisé dans l'Internet des objets (IoT) [3].

3) Protocole AMQP (Advanced Message Queuing Protocol):

Le protocole AMQP (Advanced Message Queuing Protocol) est un protocole de couche d'application standard ouvert conçu pour les intergiciels axés sur les messages. Il est largement utilisé dans la messagerie professionnelle pour faciliter la communication entre les applications et les organisations.

4) HTTP:

Hypertexte Transfer Protocol (HTTP) est un protocole de couche d'application utilisé pour transmettre des documents hypermédia, tels que HTML, sur Internet. Il est le fondement de tout échange de données sur le Web et est utilisé pour récupérer les ressources liées dirigées par l'utilisateur.

5) Protocole de messagerie et de présence extensible (XMPP) :

Le protocole de messagerie et de présence extensible (XMPP) est un protocole de communication standard ouvert conçu pour la messagerie instantanée, les informations de présence et la maintenance de la liste de contacts. Initialement nommé Jabber, il est basé sur XML (Extensible Markup Langage) et est très extensible.

I.4 Les Éléments Fonctionnels de l'IoT

Il existe plusieurs blocs de construction fondamentaux dans l'IoT qui facilitent l'exécution des tâches par les appareils intelligents, notamment la détection, l'actionnement, l'identification, l'organisation et la mise en réseau [8] [9].

I.4.1 Appareils

Les composants principaux du système IoT sont des appareils intelligents capables de réaliser une large gamme de tâches, y compris des activités de détection, de surveillance, de contrôle et d'actionnement. Toute unité IoT nécessite une variété d'interfaces pour se connecter à d'autres appareils intelligents, telles que les suivantes : interfaces pour l'accès à Internet, Audio/Vidéo (A/V), Entrée/Sortie (E/S) de détection, ainsi que des ports de mémoire et de stockage. De plus, les



Figure 2:Modèle du système.

appareils IoT varient en fonction de l'utilisation spécifique de chaque appareil, comme les exemples suivants : montres intelligentes, maison intelligente. (figureI 2) [10].

I.5 Les Avantages de l'IoT

a. **Efficacité Optimisée** : L'IoT permet une gestion efficace des ressources et des opérations.

b. **Amélioration de la Qualité de Vie** : Il contribue à des maisons intelligentes, des villes intelligentes et des soins de santé avancés.

c. **Réduction des Coûts** : Grâce à l'automatisation et à la maintenance prédictive, l'IoT réduit les coûts opérationnels.

d. **Innovation Continue** : L'IoT stimule l'innovation en permettant le développement de nouvelles applications et services intelligents [6].

I.6 Système à Base d'IoT

L'IoT repose sur plusieurs technologies de base :

- **Capteurs et Actuateurs** : Ils permettent de détecter et de réagir aux changements dans l'environnement.
- **Réseaux de Communication** : Utilisant des protocoles comme Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee, et 5G pour la transmission de données.
- **Plateformes de Traitement et de Stockage** : Le Cloud Computing et l'Edge Computing pour analyser et stocker les données collectées.
- **Sécurité et Confidentialité** : Technologies et protocoles assurant la protection des données et la confidentialité des utilisateurs [11].

I.7 Systèmes Cyber-Physiques (CPS)

1. **Définition des CPS :** Les Systèmes Cyber-Physiques (CPS) représentent une fusion sophistiquée de processus computationnels et physiques. Ils sont caractérisés par l'intégration d'ordinateurs et de réseaux pour contrôler et surveiller des processus physiques, permettant une interaction dynamique entre le monde physique et le monde numérique [1] [2].

2. **Propriétés des CPS**

Les CPS possèdent plusieurs propriétés distinctives :

- **Capacités de Communication** : Les CPS interagissent via des réseaux, permettant des échanges de données en temps réel.

❖ **Contrôle et Computation** : Ils intègrent des capacités avancées de contrôle et de calcul pour analyser et réagir aux données provenant du monde physique.

❖ **Boucles de Rétroaction** : Les CPS utilisent des boucles de rétroaction pour ajuster leurs actions en fonction des changements dans leur environnement.

❖ **Sécurité et Fiabilité** : Ils sont conçus pour être hautement sécurisés et fiables, garantissant une opération continue sans interruption [3].

1. **Origine et Développement des CPS :** Le concept de CPS a émergé en 2006 grâce aux efforts de la National Science Foundation (NSF). Initialement développés pour aller au-delà des systèmes embarqués traditionnels, les CPS ont évolué pour devenir une composante centrale de l'Industrie 4.0 en Allemagne. Leur développement continu se concentre sur l'innovation technologique et la recherche scientifique pour intégrer des systèmes physiques et computationnels de manière harmonieuse [4].

2. **Les Avantages des CPS (Système Cyber-Physique) :**

✓ **Amélioration de l'Efficacité** : Les CPS optimisent les processus industriels et manufacturiers, augmentant ainsi la productivité et la qualité.

✓ **Flexibilité et Adaptabilité** : Ils permettent une adaptation rapide aux changements environnementaux et aux nouvelles exigences du marché.

✓ **Sécurité et Précision** : Grâce à des systèmes de surveillance en temps réel, les CPS offrent une sécurité renforcée et une précision accrue dans les opérations.

✓ **Innovation Technologique** : Les CPS favorisent l'innovation continue en intégrant des technologies de pointe dans divers secteurs.

I.8 Jumeau numériques (Digital twins)

Le jumeau numérique (Digital twin) émerge comme un outil crucial pour l'industrie à venir. Il représente une version digitale d'un système physique tel qu'un produit, une machine ou une usine, reproduisant fidèlement ses caractéristiques. Il est envisagé comme un moyen de simplifier les processus de conception, de fabrication, d'utilisation, de maintenance et de recyclage, comme décrit par Grieves et Vickers [12].

Le jumeau numérique est un outil adaptable à divers types de systèmes, qu'ils soient courants comme des voitures ou professionnels comme une ligne de fabrication. Selon le cas, ses utilisateurs peuvent varier : dans le contexte d'un système courant, il peut être exploité par le fabricant pour le

suivi du produit (par exemple, pour les mises à jour du système embarqué), ou par l'utilisateur final lui-même.

Offrant un accès continu aux informations, analyses et recommandations tout au long du cycle de vie du système, le jumeau numérique permet à ses utilisateurs de bénéficier d'une vision détaillée de son état et de son fonctionnement à tout moment. En simulant le comportement anticipé du système réel à l'aide d'un modèle évolutif, il aide à prendre des décisions éclairées en consolidant et en analysant toutes les données disponibles.

Le jumeau numérique se compose de données provenant du système, organisées dans un système d'information où des modèles spécifiques préalablement développés sollicitent ces informations. Ces modèles sont conçus pour fournir à l'utilisateur les informations, recommandations et conseils les plus pertinents. Divers types de modèles peuvent être utilisés en fonction des besoins, allant des modèles mécaniques simples aux modèles de maintenance prédictive, en fonction de l'usage souhaité. Il n'existe pas un seul cadre universel pour les jumeaux numériques, et leur configuration varie en fonction du système et de son utilisation spécifique [12]**.**

Le jumeau numérique tire parti de diverses technologies de l'industrie du futur, telles que :

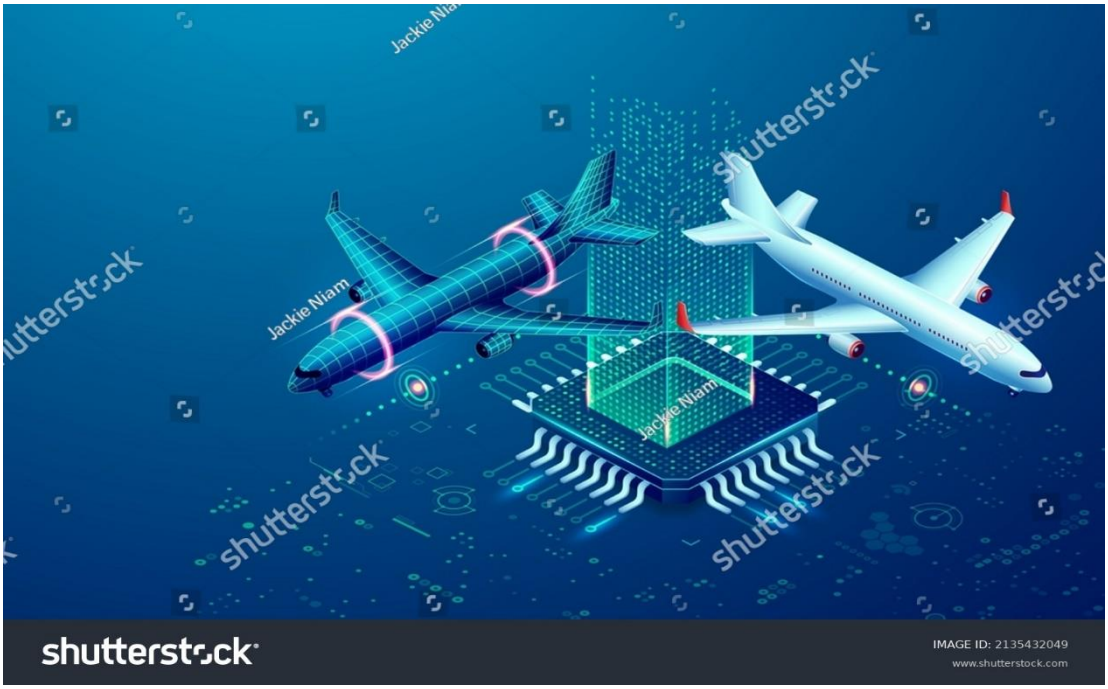
- La réalité virtuelle ou augmentée, utilisée par exemple pour fournir une assistance à la fabrication ou au dépannage à distance, offrant ainsi une approche novatrice pour l'interface.
- La modélisation de comportements assistée par ordinateur, qui permet la génération de modèles de maintenance prédictive et bénéficie également aux systèmes d'apprentissage automatisés [10].
- L'internet des objets, permettant l'enregistrement et la transmission des données du terrain nécessaires aux analyses, assurant ainsi la cohérence entre les jumeaux numériques et physiques.
- Bien que non exclusivement, le jumeau numérique peut recourir à des serveurs distants pour le stockage, le traitement et la mise à disposition des données, que ce soit localement ou à distance.
- Des actionneurs et un contrôle automatisé, permettant au jumeau numérique d'interagir avec le système physique [13].

Grâce à cette gamme de fonctionnalités, le jumeau numérique offre une panoplie de services à ses utilisateurs :

- Assistance à la conception : en intégrant les règles de conception.

- Aide au chiffrage : en intégrant le jumeau numérique dans le système d'information de l'entreprise.
- Aide à l'ordonnancement : une fois de plus, grâce à son intégration dans le système d'information.
- Assistance à la fabrication : en utilisant des instructions de montage virtuelles, générées automatiquement par le jumeau numérique.
- Aide à l'utilisation : grâce aux indicateurs qu'il génère.
- Suivi des performances.
- Maintenance prédictive.
- Aide à la reconfiguration, et bien d'autres encore.

❖ Ce sont ces fonctionnalités qui peuvent persuader un industriel ou ses employés de l'intérêt de mettre en place un jumeau numérique [12].



Digital Twin Royalty-Free Images, Stock Photos & Pictures | Shutterstock

Figure 3:jumeaux numériques

I.8.1 Les avantages jumeaux numériques :

Les jumeaux numériques offrent de nombreux avantages dans divers domaines, allant de l'industrie à la santé. Voici quelques-uns des principaux avantages des jumeaux numériques :

1. **Surveillance Continue et en Temps Réel** :

- Les jumeaux numériques permettent une surveillance continue et en temps réel des systèmes

physiques, ce qui aide à détecter les anomalies rapidement et à réagir avant qu'elles ne causent des problèmes majeurs.

2. Maintenance Prédictive :

- En analysant les données en temps réel, les jumeaux numériques peuvent prévoir les défaillances des équipements et planifier des opérations de maintenance avant que les pannes ne se produisent, réduisant ainsi les temps d'arrêt et les coûts de réparation.

3. Optimisation des Performances :

- Ils permettent d'optimiser les performances des systèmes en simulant différents scénarios et en ajustant les paramètres pour trouver les configurations les plus efficaces.

4. **Réduction des Coûts** :

- Les entreprises peuvent réduire les coûts opérationnels en utilisant des jumeaux numériques pour tester des changements dans un environnement virtuel avant de les appliquer au système physique.

5. Amélioration de la Qualité :

- Les jumeaux numériques permettent de surveiller et de contrôler la qualité des produits et des processus en temps réel, ce qui permet de détecter et de corriger les problèmes rapidement.

6. Développement et Innovation Accélérés :

- Ils facilitent le développement et l'innovation en permettant de tester et d'expérimenter de nouveaux produits et processus dans un environnement virtuel avant de les déployer dans le monde réel.

7. Sécurité Améliorée :

- Les jumeaux numériques permettent de tester les impacts des cyberattaques et de renforcer la sécurité des systèmes en identifiant et en corrigeant les vulnérabilités sans risquer les infrastructures réelles.

8. Gestion de la Complexité :

- Ils aident à gérer la complexité des systèmes modernes en offrant une vue d'ensemble intégrée de toutes les composantes et de leurs interactions, facilitant ainsi la prise de décisions informées.

9. Formation et Simulation :

- Les jumeaux numériques peuvent être utilisés pour former les employés en simulant des situations réelles dans un environnement virtuel, améliorant ainsi leurs compétences et leur préparation face aux

situations critiques.

10. Soutien à la Décision :

- En fournissant des analyses détaillées et des visualisations des données, les jumeaux numériques aident les décideurs à prendre des décisions éclairées basées sur des informations précises et actualisées.

les jumeaux numériques offrent des avantages significatifs en termes de surveillance, maintenance, optimisation, réduction des coûts, amélioration de la qualité, innovation, sécurité, gestion de la complexité, formation et soutien à la décision. Ils constituent un outil puissant pour améliorer l'efficacité et la résilience des systèmes physiques.

I.8.2 Limitations et Défis des Jumeaux Numériques

Les jumeaux numériques présentent plusieurs limites et défis, malgré leurs nombreux avantages. Voici quelques-unes des principales limites des jumeaux numériques :

1. Complexité de la Modélisation : La création et la mise à jour des jumeaux numériques nécessitent des modèles précis et complets des systèmes physiques, ce qui peut être complexe et nécessite des compétences spécialisées.

2. Intégration des Données : Les données provenant de différentes sources doivent être intégrées de manière cohérente pour assurer la précision et la fiabilité des jumeaux numériques.

3. Coût de Développement et de Maintenance : La création et le maintien de jumeaux numériques sophistiqués peuvent être coûteux en termes de ressources financières, humaines et technologiques.

4. Sécurité et Confidentialité des Données : Les jumeaux numériques

nécessitent la gestion sécurisée des données sensibles et critiques, afin de protéger contre les cyberattaques et les violations de la vie privée.

5. Limitations des Capteurs et des Technologies : La précision des jumeaux numériques dépend de la qualité et de la précision des données fournies par les capteurs IoT et d'autres technologies, ce qui peut limiter leur efficacité dans certains environnements.

6. Évolutivité : Adapter les jumeaux numériques à des systèmes plus complexes ou à grande échelle peut poser des défis en termes de gestion des ressources et de capacité de traitement.

7. Interprétation des Données : Les informations générées par les jumeaux numériques

nécessitent une analyse experte pour être correctement interprétées et utilisées dans la prise de décision.

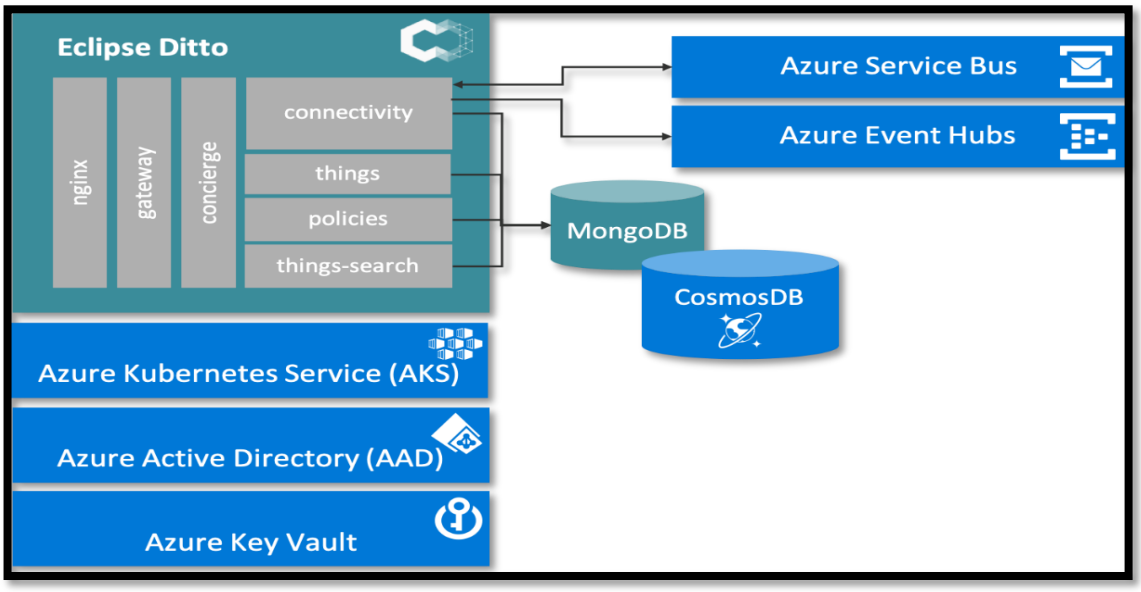
8. Dépendance à la Connexion Internet : Comme les jumeaux numériques fonctionnent sur des données en temps réel, une connexion Internet fiable est essentielle, ce qui peut poser des problèmes dans des environnements à faible connectivité.

Bien que les jumeaux numériques offrent des avantages significatifs en termes de surveillance, d'optimisation et de simulation des systèmes physiques, ils nécessitent une gestion prudente des défis liés à la modélisation complexe, à la sécurité des données, à l'intégration des technologies et à la gestion des coûts pour maximiser leur efficacité et leur valeur.

I.9 Création et Utilisation de Jumeaux Numériques avec Eclipse Ditto

I.9.1 Eclipse ditto

(figure 4) . Illustre les services Ditto, englobant ses composants, les terminaux API fournis et consommés en externe, ainsi que ses dépendances externes telles que MongoDB et nginx. De plus, il délimite les interrelations entre ces services(2).



https://blog.bosch-digital.com/how-digital-twins-boost-development-in-the-iot

Figure 4:Ditto architecture

Les composantes ont les tâches suivantes :

- **Policies :** persistance + application (autorisation) des politiques.
- **Things :** persistance + application (autorisation) des objets et des fonctionnalités.
- **Things-Search:** suivi des modifications apportées aux objets, fonctionnalités, politiques et mise à jour d'un index de recherche optimisé + exécuter les requêtes sur cet index de recherche.
- **Gateway:** fournit HTTP et WebSocket API.
- **Connectivity:**
  - Persistence des connexions.
  - Envoie des messages Ditto Protocol aux courtiers de messages externes et en reçoit des messages.

I.10 Transformations Industrielles et Urbaines grâce aux Jumeaux Numériques d'IBM :

- **Industrie 4.0 et Fabrication Avancée** :

  - Dans le cadre de l'industrie 4.0, IBM utilise des jumeaux numériques pour simuler des processus de production, tester des scénarios d'optimisation et améliorer la planification des

opérations. Cela aide les fabricants à réduire les coûts, à améliorer la qualité et à accélérer l'innovation produit(1).

- **Gestion des Infrastructures Intelligentes** :

  - IBM applique des jumeaux numériques pour gérer les infrastructures critiques telles que les réseaux d'énergie, les systèmes de transport et les bâtiments intelligents. Ces applications permettent une gestion proactive des actifs, une optimisation de la consommation d'énergie et une réponse rapide aux incidents(1).

I.11 Conclusion

Ce chapitre a exploré en profondeur les systèmes cyber-physiques (CPS) et les jumeaux numériques, deux piliers essentiels de l'industrie 4.0. Nous avons commencé par définir les jumeaux numériques, qui sont des répliques virtuelles précises de systèmes physiques. Ces répliques permettent une surveillance en temps réel, une analyse approfondie et des simulations avancées grâce à des technologies comme l'Internet des objets (IoT), la réalité virtuelle et augmentée, et l'intelligence artificielle.

Ensuite, nous avons défini et décrit les propriétés distinctives des CPS. Ces systèmes intègrent des capacités avancées de communication, de contrôle et de calcul, optimisant ainsi les interactions entre le monde physique et le monde numérique. Depuis leurs origines soutenues par la National Science Fondation jusqu'à leur rôle central dans l'industrie 4.0, les CPS ont démontré leur impact significatif sur l'efficacité, la flexibilité et la sécurité des opérations industrielles.

L'Internet des objets (IoT) a également été discuté en profondeur, avec plusieurs définitions pour capturer sa portée et son influence croissante. Nous avons décrit les éléments fonctionnels de l'IoT, tels que les dispositifs de détection, les réseaux de communication et les plateformes de traitement, qui facilitent l'interaction et la coordination entre les appareils intelligents [15].

Enfin, nous avons abordé les prérequis nécessaires à la mise en œuvre des jumeaux numériques. Nous avons souligné l'importance d'une vision stratégique claire, d'un engagement fort de la direction et de la maîtrise des outils et des données numériques. Le niveau de maturité numérique des entreprises, ainsi que les priorités et les prérequis organisationnels et technologiques, sont cruciaux pour garantir le succès de l'intégration des jumeaux numériques [16].

Dans ce chapitre a établi une base solide pour comprendre comment les CPS et les jumeaux numériques révolutionnent les industries. Ces systèmes combinent des technologies avancées pour améliorer la performance, la sécurité et l'innovation, faisant des CPS et des jumeaux numériques des

outils essentiels pour l'optimisation et la prédiction, et des moteurs

du progrès technologique continu.

II Chapitre II : Vérification des systèmes

II.1 Introduction

La vérification des systèmes est un aspect fondamental de l'ingénierie et de la gestion des technologies modernes. Elle implique l'évaluation systématique des composants, des processus et des systèmes entiers pour s'assurer qu'ils fonctionnent correctement, répondent aux spécifications et sont exempts de défauts. La vérification est cruciale dans divers domaines, allant de la fabrication industrielle aux technologies de l'information, en passant par les systèmes embarqués et les infrastructures critiques.

Le processus de vérification des systèmes peut inclure une multitude de méthodes et de techniques, telles que les tests, les inspections, les analyses formelles et les simulations. Chaque méthode a ses propres avantages et inconvénients et est souvent utilisée en combinaison pour garantir une couverture maximale et une détection précoce des problèmes. Par exemple, les tests dynamiques permettent de vérifier le comportement du système en conditions réelles, tandis que les analyses formelles fournissent une validation rigoureuse basée sur des modèles mathématiques.

Dans le contexte des systèmes cyber-physiques (CPS) et des jumeaux numériques, la vérification revêt une importance encore plus grande. Ces systèmes, qui intègrent des éléments physiques et numériques, sont souvent complexes et dynamiques. La vérification en temps réel, ou vérification à l'exécution, devient essentielle pour détecter les anomalies et garantir la sécurité et la fiabilité continues.

Ce projet explore les différentes facettes de la vérification des systèmes en mettant un accent particulier sur l'intégration de jumeaux numériques pour la surveillance et l'amélioration des performances des CPS. En utilisant des technologies avancées telles qu'Eclipse Ditto, nous visons à démontrer comment les jumeaux numériques peuvent être utilisés pour une vérification proactive et continue, assurant ainsi une meilleure gestion et optimisation des systèmes.

II.2 Technique vérification

II.2.1 Vérification basée sur les modèles

La vérification basée sur les modèles (model checking) est une méthode systématique qui utilise des techniques formelles pour vérifier que les modèles d'un système satisfont à certaines propriétés spécifiées. Cette technique examine tous les états possibles d'un système pour s'assurer que les propriétés définies (comme la sécurité ou l'absence de conditions de course) sont respectées [12].

II.2.1.1 Vérification du modèle explicite

- **Construction du Modèle :**

- Tout d'abord, pour appliquer le model checking explicite, on doit construire un modèle formel du système à analyser. Ce modèle peut prendre la forme d'un graphe d'états où chaque nœud représente un état possible du système et chaque arête représente une transition entre ces états. Par exemple, dans un système de contrôle d'accès, les états pourraient représenter différentes configurations de permissions et les transitions les actions qui modifient ces configurations.

- **Exploration Complète :**

  - Une fois le modèle construit, le model checking explicite explore de manière systématique et exhaustive tous les chemins possibles à travers ce graphe d'états. Cela signifie qu'il vérifie chaque état et chaque transition pour s'assurer que le système ne peut pas atteindre des états indésirables ou des comportements incorrects.

II.2.1.2 Vérification symbolique du modèle

- **Représentation Symbolique :**

  - Contrairement au model checking explicite qui explore chaque état individuellement, le model checking symbolique représente les ensembles d'états et de transitions de manière symbolique. Cela signifie qu'il manipule des structures de données abstraites qui représentent des ensembles d'états plutôt que des états individuels. Par exemple, au lieu de représenter chaque état du système, on peut représenter un ensemble d'états qui partagent des propriétés communes.

- **Manipulation de Formules Logiques :**

  - Le cœur du model checking symbolique réside dans la manipulation de formules logiques qui décrivent les ensembles d'états et les relations de transition. Ces formules logiques peuvent inclure des expressions booléennes, des conditions sur les variables du système, etc. Au lieu de générer explicitement chaque état, le model checking symbolique utilise des techniques d'algèbre booléenne pour vérifier des propriétés sur ces ensembles d'états.

II.2.1.3 Vérification du modèle temporel

- **Propriétés Temporelles** :

Le model checking temporel permet de spécifier et de vérifier des propriétés qui impliquent des relations temporelles entre les événements ou les états d'un système. Ces propriétés peuvent inclure des assertions telles que "toujours" (always), "éventuellement" (eventually), "jusqu'à ce que" (until),

"après" (after), etc. Par exemple, une propriété temporelle peut être formulée pour vérifier si une certaine condition sera vraie à tout moment ou finalement atteinte après un certain nombre de transitions dans le système.

- **Langages de Spécification Temporelle :**

Pour exprimer ces propriétés, divers langages de spécification temporelle sont utilisés, parmi lesquels les plus connus sont :

CTL (Computational Tree Logic) : Utilisé pour exprimer des propriétés sur les chemins dans un arbre d'exécution du système.

LTL (Linear Temporal Logic) : Utilisé pour spécifier des propriétés sur les séquences infinies d'états d'un système.

CTL (CTL star) : Une extension de CTL qui permet d'exprimer une plus large gamme de propriétés temporelles complexes.:

II.2.1.1 modèle de système :

Spécification des propriétés :

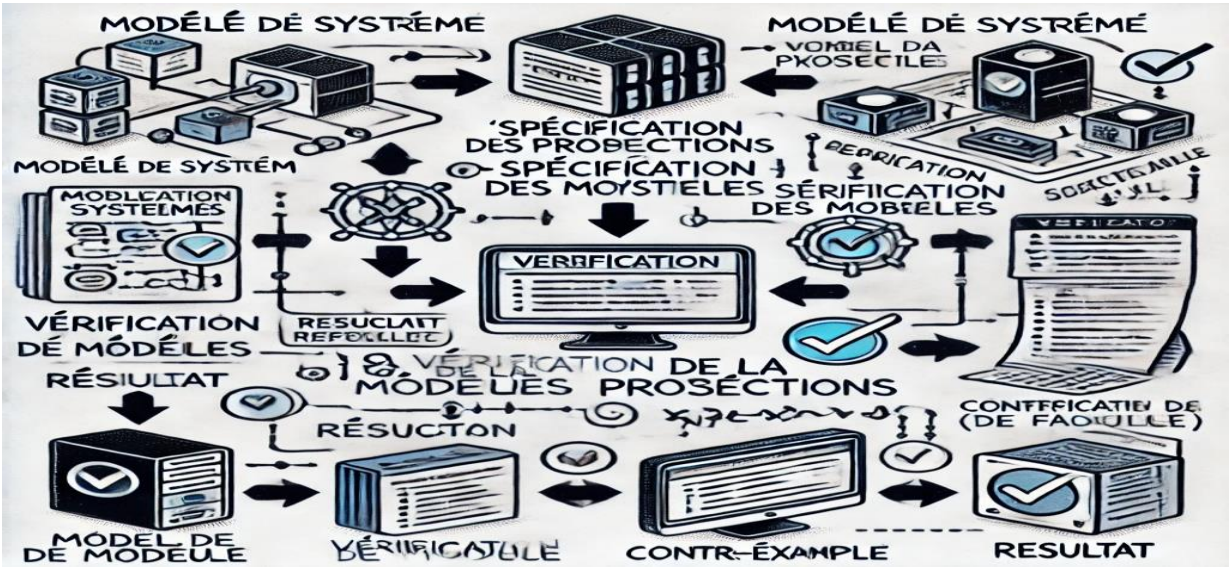
Définit les propriétés à vérifier.

Outil de vérification (Vérificateur de modèle) : Outil utilisé pour la vérification.

Processus de vérification : Les étapes suivies pendant la vérification.

Résultat : Montre l'issue du processus de vérification (Vérifié/Contre-exemple).

Cette figure illustre le flux des différentes étapes du processus de vérification, depuis la modélisation du système jusqu'à l'obtention des résultats.



https://www.bing.com/search?q=v%c3%a9rification+des+syst%c3%a8me&FORM=AWRE&ntref=1

Figure 5: Modèle du système

II.2.2 Vérification au moment de l'exécution

La vérification à l'exécution est un processus informatique qui consiste à surveiller le comportement d'un système logiciel ou matériel pendant son fonctionnement actif. L'objectif principal de cette vérification est de détecter et de réagir aux violations potentielles des spécifications ou des contraintes préétablies. Elle permet de garantir que le système opère conformément aux exigences fonctionnelles et de sécurité définie, en signalant toute déviation ou tout comportement anormal en temps réel.

II.2.2.1 Surveillance Passive

Le système est surveillé sans intervenir dans son fonctionnement, les violations sont simplement enregistrées pour une analyse ultérieure

II.2.2.2 Surveillance Active

Le système est surveillé et les actions correctives sont prises en temps réel en cas de détection de violations des propriétés spécifiées.

II.3 Technique de vérification a l'exécution

Les techniques de vérification à l'exécution sont des méthodes utilisées pour surveiller et vérifier le comportement d'un système en temps réel pendant son fonctionnement actif. Elles sont essentielles pour détecter les violations potentielles des spécifications ou des contraintes prédéfinies. Voici quelques techniques couramment utilisées :

1. **Monitoring basé sur des règles** : Cette technique utilise des règles prédéfinies pour surveiller les événements et les états du système en temps réel. Les violations de ces règles déclenchent des alertes pour signaler des comportements non conformes.

2. **Surveillance de propriétés formelles** : Elle repose sur des spécifications formelles exprimées dans des langages comme LTL (Linear Temporal Logic) ou CTL (Computation Tree Logic). Ces spécifications sont vérifiées dynamiquement pendant l'exécution pour garantir le respect des propriétés spécifiées.

3. **Analyse de traces et de logs** : Cette technique consiste à enregistrer et à analyser les traces d'exécution du système, telles que les logs d'événements. Elle permet de détecter des modèles anormaux ou des erreurs en comparant les traces en temps réel avec des modèles attendus.

4. **Monitoring basé sur des modèles** : Ici, des modèles comportementaux sont construits à partir du système ou spécifiés à l'avance. Le monitoring en temps réel vérifie si le comportement observé du système correspond aux prédictions faites par ces modèles.

5. **Approches basées sur les contrats** : Les contrats sont des spécifications formelles des obligations et des garanties que chaque composant ou service du système doit respecter. La vérification à l'exécution utilise ces contrats pour vérifier si les interactions entre les composants respectent ces obligations.

II.4 Les avantage de vérification

Les avantages de la vérification à l'exécution sont multiples et significatifs dans le domaine de l'ingénierie des systèmes et des logiciels. Voici quelques-uns des principaux avantages :

1. **Détection précoce des erreurs** : La vérification à l'exécution permet de détecter les erreurs et les comportements non conformes dès qu'ils se produisent, réduisant ainsi les risques potentiels avant qu'ils ne deviennent des problèmes plus graves.

2. **Amélioration de la fiabilité** : En surveillant en continu le comportement du système, cette approche contribue à améliorer la fiabilité globale en identifiant rapidement les défaillances et les violations de spécifications.

3. **Diagnostic des anomalies** : Elle facilite le diagnostic rapide des anomalies et des défaillances en fournissant des alertes et des rapports détaillés sur les comportements inattendus ou non souhaités.

4. **Garantie de la conformité** : La vérification à l'exécution assure que le système respecte les spécifications et les contraintes spécifiques qui lui sont imposées, assurant ainsi la conformité aux normes et aux régulations.

5. **Réduction des coûts de maintenance** : En identifiant précocement les problèmes, elle contribue à réduire les coûts associés à la maintenance corrective et à minimiser l'impact sur la production.

6. **Adaptabilité et flexibilité** : Elle permet une adaptation dynamique aux changements de comportement et aux conditions opérationnelles, ce qui est essentiel dans les systèmes en évolution constante.

7. **Amélioration de la sécurité** : En surveillant en temps réel les activités du système, elle renforce la sécurité en détectant les intrusions et les comportements malveillants potentiels.

II.5 Mise en œuvre de la vérification à l'exécution

La mise en œuvre de la vérification à l'exécution est une étape critique pour intégrer cette technique dans le développement de systèmes logiciels et matériels. Voici les aspects clés de sa mise en œuvre :

- **Intégration dans le cycle de développement :** La vérification à l'exécution doit être planifiée dès les premières phases du cycle de développement du système. Elle nécessite une intégration étroite avec les processus de conception, de codage et de test pour assurer une surveillance continue et efficace.

- **Choix des outils et des technologies :** Sélectionner les bons outils et technologies est crucial. Cela inclut les outils de surveillance en temps réel, les Framework de test automatisé, les capteurs matériels pour la collecte de données, et les plateformes de reporting et d'analyse des résultats.

- **Définition des spécifications et des règles :** Il est essentiel de définir clairement les spécifications, les règles de vérification et les seuils d'alerte pour détecter les comportements non conformes. Cela garantit que la vérification à l'exécution est alignée avec les exigences fonctionnelles et non fonctionnelles du système.

- **Configuration des environnements de surveillance** : Mettre en place des environnements de surveillance adaptés pour collecter, analyser et visualiser les données en

temps réel est nécessaire. Cela implique souvent l'utilisation de serveurs dédiés, de bases de données pour le stockage des logs, et de solutions cloud pour l'analyse distribuée.

- **Validation et ajustement continu** : Une fois mis en place, le système de vérification à l'exécution doit être validé et ajusté en fonction des résultats obtenus dans des conditions réelles. Cela inclut la révision périodique des spécifications, des règles de vérification et des alertes pour optimiser la précision et la pertinence des résultats.

- **Formation et support :** Fournir une formation adéquate aux équipes sur l'utilisation des outils et des techniques de vérification à l'exécution est essentiel. Un support continu est également nécessaire pour résoudre les problèmes techniques et améliorer les compétences des utilisateurs**.**

II.6 Vérification des systèmes cyber-physiques

La vérification de systèmes cyber-physiques (CPS) est une discipline qui assure que ces systèmes, qui intègrent des composants physiques et logiciels, fonctionnent correctement et répondent aux spécifications souhaitées. Voici un aperçu détaillé :

1. Objectifs de la vérification de CPS

La vérification vise à :

Assurer la sûreté et la fiabilité du système.

Garantir que le système respecte les spécifications formelles.

Détecter et corriger les erreurs avant la mise en service.

2. Techniques de vérification

a. Modélisation formelle

Les modèles formels utilisent des mathématiques pour spécifier et analyser le comportement des systèmes. Ils permettent de décrire précisément les interactions entre les composants physiques et logiciels.

b. Model Checking

Cette technique consiste à vérifier automatiquement si un modèle d'un système satisfait à certaines propriétés spécifiées (comme des invariants de sécurité). Elle est largement utilisée pour les CPS en raison de sa capacité à explorer tous les états possibles d'un système [1].

c. Théorème prouvant

Cette méthode utilise des prouveurs automatiques pour démontrer que certaines propriétés

sont vraies pour tous les cas possibles. Elle est particulièrement utile pour les systèmes complexes où les tests exhaustifs sont impraticables [6].

d. Simulation et essais

Ces techniques permettent de tester le comportement du système dans divers scénarios pour vérifier qu'il répond aux attentes. Les simulations peuvent inclure des modèles physiques et des algorithmes de contrôle.

3. Exemples

A. Automobile

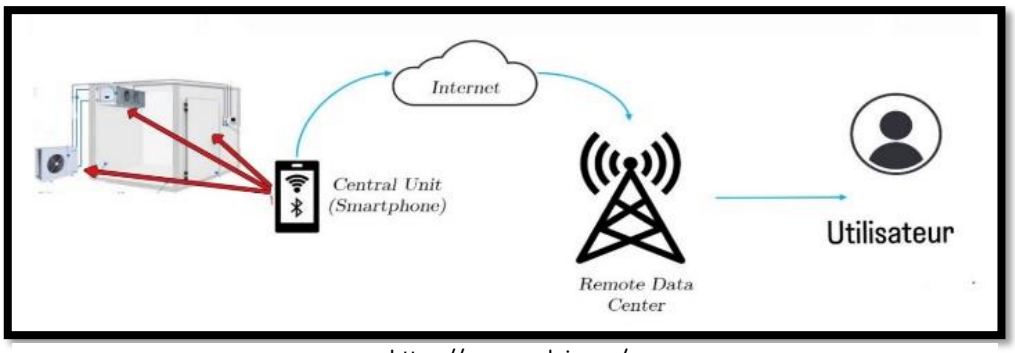
Les systèmes d'assistance à la conduite (ADAS) utilisent des techniques de vérification pour assurer la sûreté des algorithmes de contrôle et de détection.

B. Santé

Les dispositifs médicaux comme les pompes à insuline ou les pacemakers nécessitent une vérification rigoureuse pour garantir qu'ils fonctionnent correctement et sans danger.

C. Infrastructures critiques

Les réseaux électriques intelligents utilisent des CPS pour gérer la distribution d'énergie. La vérification assure que ces systèmes fonctionnent de manière fiable même en cas de perturbations.



https://www.mdpi.com/

Figure 6:Vérification de CPS.

II.7 Conclusion

En conclusion, la vérification des systèmes et des systèmes cyber-physiques (CPS) est une étape cruciale pour garantir leur bon fonctionnement. Les techniques de vérification formelle, telles que les modèles de vérification et les simulations, sont des outils indispensables pour anticiper et résoudre

les défaillances potentielles. Elles permettent d'assurer que les systèmes respectent les spécifications initiales et fonctionnent de manière optimale même dans des environnements complexes et changeants.

Les méthodes de vérification formelle offrent des garanties robustes, en permettant une analyse exhaustive des états possibles d'un système. Cela est particulièrement pertinent pour les CPS, où l'interaction entre les composants physiques et les éléments logiciels doit être rigoureusement contrôlée pour éviter les comportements indésirables.

De plus, l'utilisation de jumeaux numériques et d'autres outils de simulation permet de tester et d'optimiser les systèmes de manière proactive, offrant une plateforme sécurisée pour expérimenter et améliorer les performances sans risques pour les systèmes réels.

En intégrant ces approches dès la conception et tout au long du cycle de vie des CPS, on peut non seulement améliorer leur efficacité opérationnelle, mais aussi renforcer leur résilience face aux défaillances et aux anomalies. La vérification continue et en temps réel est essentielle pour les applications critiques, notamment dans les secteurs industriels, médicaux et de transport, où la fiabilité des systèmes est primordiale.

III Chapitre III : Conception

III.1 Introduction

Ainsi, l'utilisation des jumeaux numériques en tant que couche de vérification essentielle pour les CPS devient impérative afin d'assurer leur résilience face aux menaces potentielles. En reproduisant le comportement des composants physiques, les jumeaux numériques fournissent une émulation en temps réel des fonctionnalités des CPS, permettant la vérification des contraintes essentielles à leur fonctionnement fiable.

Pour relever efficacement ce défi, l'utilisation des jumeaux numériques émerge comme une solution innovante. La vérification en temps d'exécution des contraintes dans les CPS permet d'éviter les problèmes liés à leur comportement, préservant ainsi leur fonctionnalité.

Nous proposons le développement d'une application basée sur les jumeaux numériques pour la vérification et le contrôle en temps réel de la fonctionnalité des CPS. Ces représentations virtuelles offrent un moyen dynamique de simuler et de surveiller les performances des systèmes physiques de manière autonome. Une telle approche constitue labase de la détection d'anomalies, de la maintenance préventive et de l'optimisation des opérations des composants au sein du système.

Dans ce chapitre, nous explorerons les subtilités de la conception et de la mise en œuvred'un vérificateur de contraintes pour les CPS, en utilisant les jumeaux numériques comme technologie fondamentale.

III.2 Idée Générale

Les systèmes cyber-physiques (CPS) est cruciale pour garantir leur bon fonctionnement et atténuer les risques potentiels. En raison de leur intégration étroite entre lemonde physique et numérique, les CPS nécessitent des mesures de sécurité robustes pour se protéger contre les cyberattaques, les défaillances matérielles et les erreurs de conception l'architecture est représenté dans la figure III 1.

Dans ce chapitre, nous décrirons notre solution, qui repose sur les jumeaux numériques entant que couche de vérification pour garantir la sécurité des CPS. Le jumeau numérique sera conçu pour reproduire le comportement des composants des CPS afin d'assurer la vérificationdes contraintes des CPS.

1. **Couche physique :** Cette couche du modèle architectural proposé englobe toutes les ressources industrielles physiques, y compris les produits, les travailleurs, les

équipements, la technologie, les processus, les environnements et les installations. Elle représente l'environnement industriel primaire qu'une entreprise vise à contrôler, comprenant des dispositifs observables nécessitant une surveillance et une détection, ainsi que ceux pouvant être actionnés et contrôlés.

2. **Couche Cyber-Physique** : La couche cyber-physique comprend les composants physiques d'un système intégrés à leurs homologues numériques. Cette couche comblele fossé entre le monde physique et le domaine numérique en connectant les capteurs, les actionneurs et autres dispositifs physiques aux réseaux numériques. Les capteurs collectent des données de l'environnement physique, telles que la température, la pression ou le mouvement, et les transmettent aux systèmes numériques pour traitement. Les actionneurs, quant à eux, reçoivent des commandes des systèmes numériques et les traduisent en actions physiques, telles que l'ajustement de la température, l'activation.

3. **Couche de Communication** : Cette couche est responsable de connecter un dispositif physique à sa réplique virtuelle et d'établir une communication pour leur synchronisation. Elle représente un canal de communication pour l'échange de messages entre les Jumeaux Physiques (JP) et les Jumeaux Numériques (JN). Cette couche peut fournir des modèles de communication unidirectionnelle et bidirectionnelle pour surveiller les données détectées et contrôler l'actionneur avec descommandes/réponses, respectivement.

4. **Couche cyber** : La couche cyber englobe à la fois le cadre des jumeaux numériques et l'application utilisateur finale, constituant l'épine dorsale des CPS. Les jumeaux numériques reproduisent fidèlement le comportement et les attributs des éléments physiques au sein des CPS, permettant la surveillance, la simulation et l'analyse du système dans un espace virtuel. Ils soutiennent des fonctions telles que la prédiction des performances, la détection des anomalies et l'optimisation opérationnelle. Alimentés par les données collectées par des capteurs intégrés au système physique et transmises à travers la couche de communication, les jumeaux numériques éclairent la prise de décision et la mise en œuvre d'actions dans le système réel. De plus, ils renforcent la résilience et l'adaptabilité du système en permettant les tests de scénarios,la conception de stratégies d'optimisation et la simulation d'événements imprévus.

   Pendant ce temps, la couche d'application utilisateur final agit comme l'interface à travers laquelle les utilisateurs interagissent avec les CPS et leur jumeau numérique. Cette couche comprend diverses applications, interfaces et tableaux de bord conçus pour fournir aux utilisateurs un accès aux données système, aux commandes et aux fonctionnalités. Les utilisateurs peuvent exploiter ces applications pour définir des contraintes, surveiller le

comportement du système, analyser les performances et prendre des décisions éclairées basées sur les données en temps réel et les perspectives fournies par le jumeau numérique. De plus, des fonctionnalités telles que les notifications, les alertes et les outils de reporting maintiennent les utilisateurs informés sur l'état du système, les anomalies et les événements importants, facilitant une gestion et une optimisation efficaces des CPS pour répondre à des besoins et des objectifs spécifiques.

Les jumeaux numériques, la pierre angulaire de cette couche, se composent de trois composants principaux :

- **Connectivité** : Ce module est chargé d'établir des connexions avec la couche de communication et les applications. Une application de la couche d'application peut consommer des services fournis par un dispositif physique via son jumeau numérique. De même, un dispositif dans la couche des appareils peut synchroniser son état ou ses données mises à jour avec son jumeau numérique via la couche de communication.
- **Stockage** : Dans le contexte du stockage, un modèle de dispositif est un objet décrivant le dispositif physique. Il sert principalement de point d'ancrage pour diverses caractéristiques et attributs associés au dispositif. Ces modèles contiennent des informations détaillées sur les caractéristiques du dispositif et peuvent stocker un nombre variable de caractéristiques. Chaque caractéristique gère l'ensemble des données et fonctionnalités du dispositif, fournissant une structure de stockage efficace pour les objets au sein des jumeaux numérique

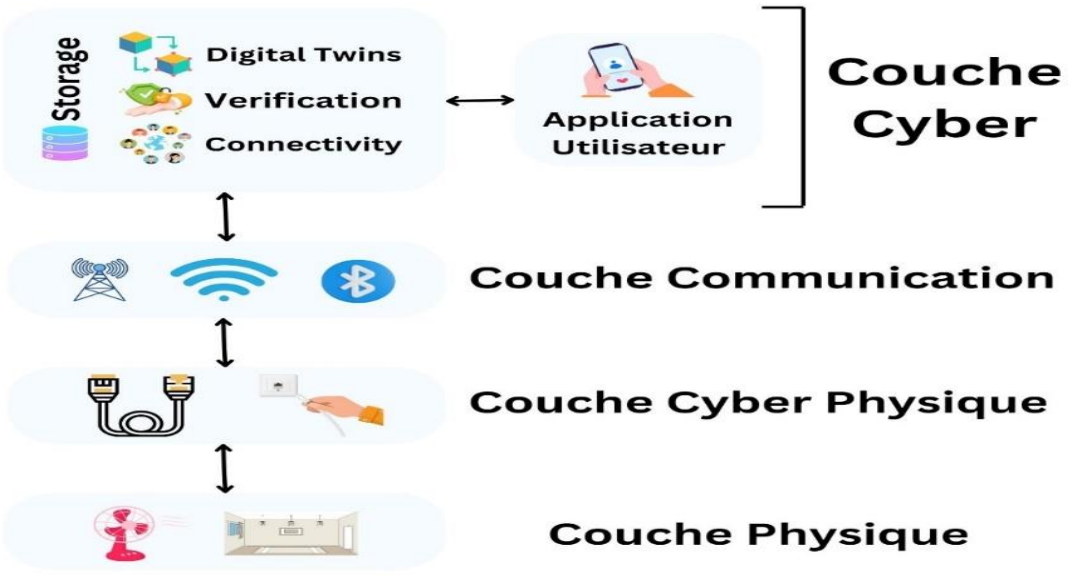


Figure 7:L'architecture proposée

I. Jumeaux numériques pour les systèmes cyber-physiques

Notre démarche se base sur la construction d'un jumeau numérique pour le CPS afin de l'utiliser comme moyen de vérification au moment de l'opération du CPS. Nous illustrons la construction des jumeaux numériques pour les CPS à travers un cas d'étude considérant une chambre froide.

Les fruits, les légumes et d'autres produits nécessitent un refroidissement et un entretien constants pour éviter la détérioration ou la contamination. Pour répondre à ce besoin, ils sont placés dans des chambres froides. Cependant, la surveillance manuelle de ces chambres peut être insuffisante et sujette à des erreurs.

Dans notre cas la chambre froide est construite sous forme d'un CPS, la figure ci-après montre le digramme de définition de blocks pour la chambre froide. Comme décrit le CPS permet d'assurer une surveillance continue de la chambre froide. Il contrôle divers paramètres critiques tels que la température, l'humidité, et veille à ce que les portes et fenêtres soient bien fermées. De plus, il surveille les climatiseurs et ventilateurs.

Tout cela est conçu en se basant sur l'architecture proposé dans la section précédente. Pour la construction du jumeau numérique, nous proposons de représenter chaque composant du CPS avec ses attributs et ses propitiées sous forme d'entités virtuelles conformément au méta-modèle décrit dans le cadre de la plateforme Eclipse ditto [23]

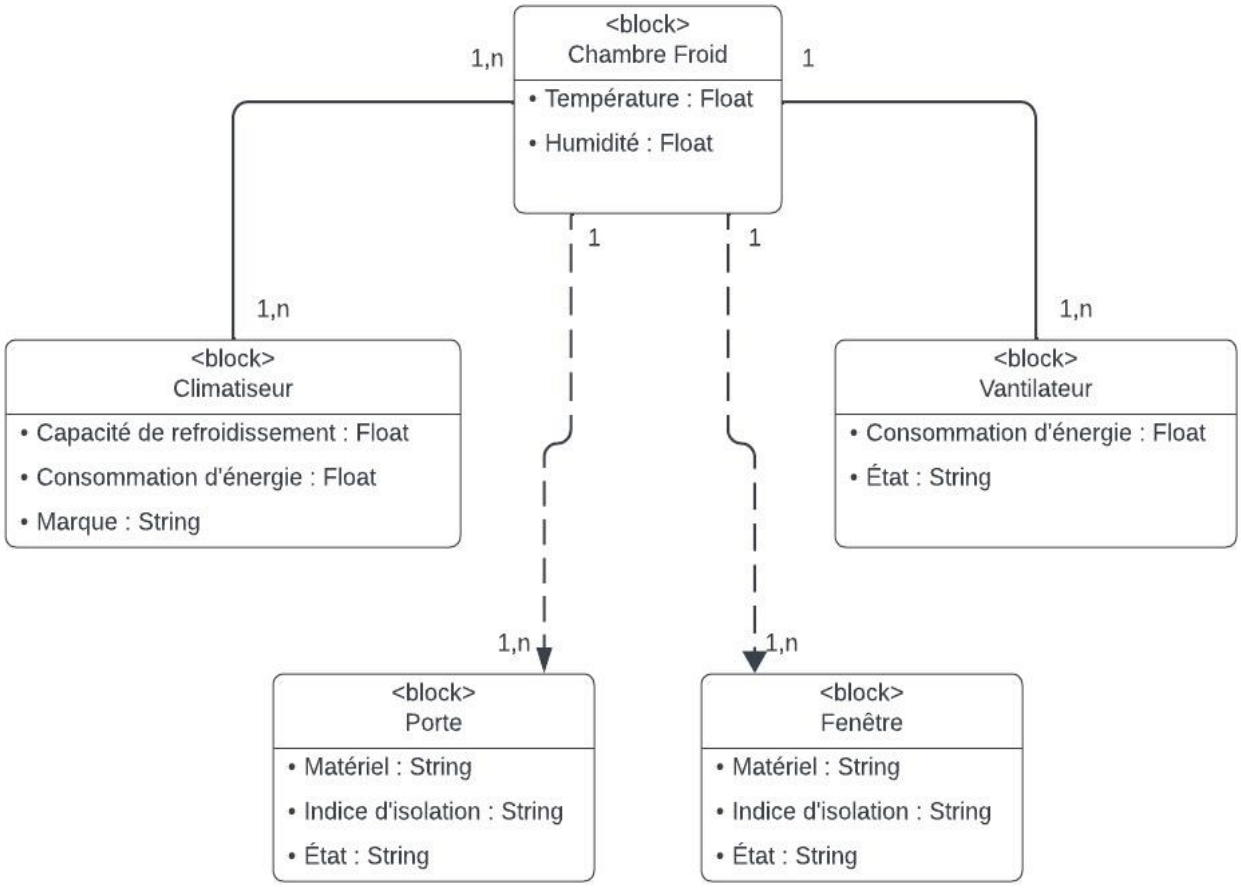


Figure 8: Diagramme block SYSML

Le graphique présenté à la figure **8**, élabore un modèle jumeau numérique pour le CPS chambre froide.

Dans le cas général, il est nécessaire d'examiner chaque composant du CPS en détail et d'identifier ses caractéristiques spécifiques et ses éléments. Après cela, nous représentons chaque composants comme un **Thing** (une entité virtuel).

-

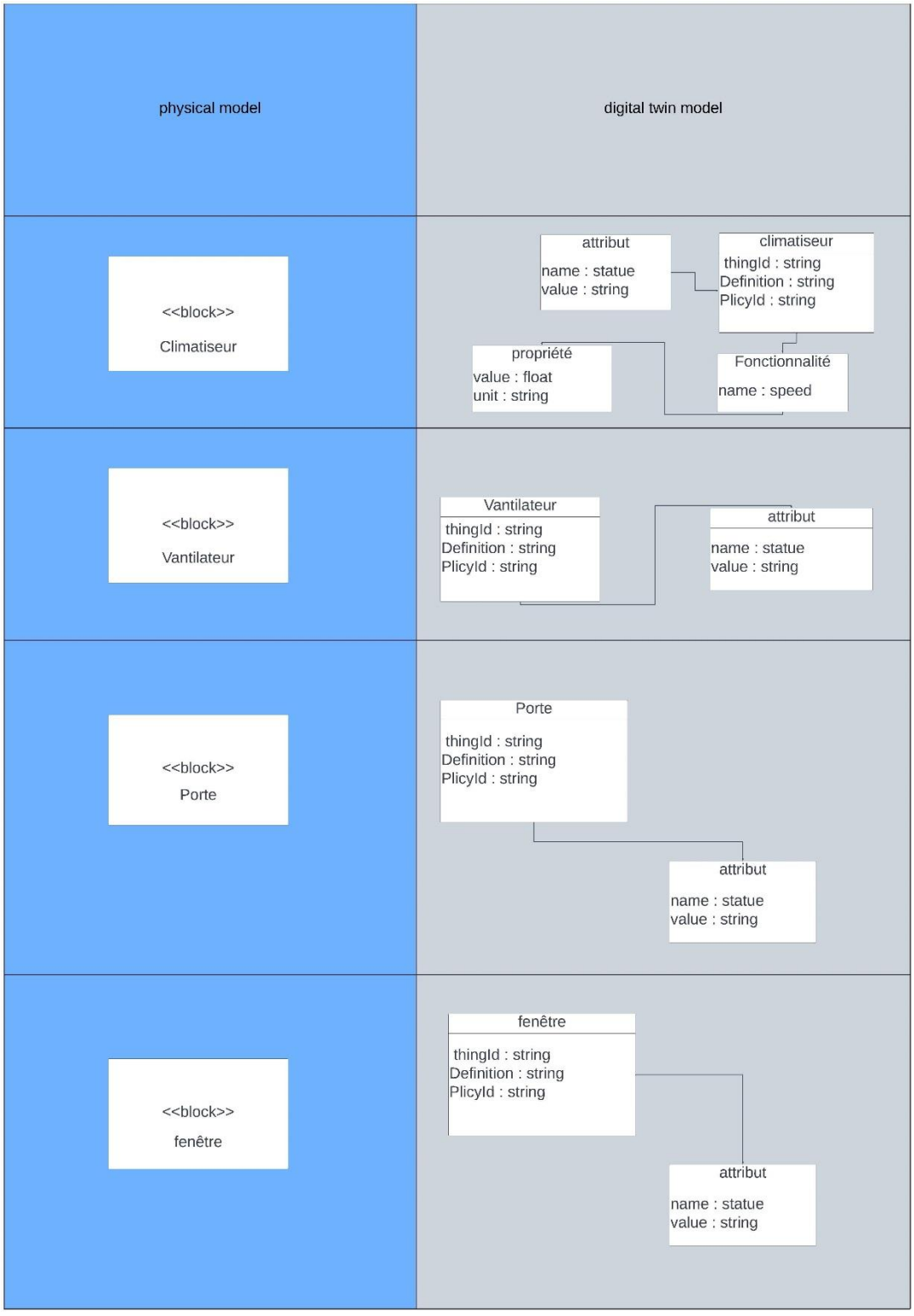


Figure10:créations de jumeau numérique

III.3 Jumeaux numériques pour la vérification des systèmes cyber-physiques (CPS)

Représentent une convergence innovante entre les mondes physique et numérique. Les CPS se caractérisent par des dispositifs physiques, des capteurs et des actionneurs connectés à des réseaux informatiques, permettant une interaction étroite entre les systèmes physiques et informatiques. Ces systèmes offrent une gamme diversifiée d'applications et sont devenus omniprésents dans notre vie quotidienne [30].

Dans divers domaines tels que la fabrication, les transports, les soins de santé, l'énergie et l'agriculture, les CPS jouent un rôle crucial dans l'optimisation des processus, l'amélioration de la productivité et la fourniture de services plus efficaces. Ils permettent une gestion intelligente des ressources, une surveillance en temps réel des opérations et une prise de décision automatisée pour répondre aux exigences environnementales changeantes.

Cependant, avec l'intégration croissante de la technologie dans les systèmes physiques, garantir la vérification des CPS, telle que la détection des anomalies, le contrôle d'accès et la vérification globale, est devenue une préoccupation majeure. Étant donné que les CPS combinent à la fois des éléments physiques et cybernétiques, ils sont vulnérables aux cyberattaques et aux menaces sécuritaires. Assurer la sécurité des CPS est donc un défi critique qui nécessite une attention particulière.

La vérification des CPS est un aspect crucial qui concerne la protection des vies humaines, de l'environnement et des biens contre les incidents et accidents imprévus. Contrairement à la sécurité, qui se concentre principalement sur la protection contre les menaces externes telles que les cyberattaques, la vérification vise à garantir que les systèmes fonctionnent de manière fiable et sûre, même en cas de défaillance interne ou de situations d'urgence.

L'importance de la vérification des CPS réside dans sa capacité à prévenir les défaillances catastrophiques qui pourraient avoir des conséquences dévastatrices pour les personnes et l'environnement. Dans des domaines critiques tels que les transports, les soins de santé et l'énergie, la sécurité des CPS est essentielle pour garantir le bon fonctionnement des infrastructures et la fourniture continue de services vitaux.

En garantissant la vérification des CPS, nous pouvons atténuer le risque d'accidents, réduire les dommages potentiels, et maintenir la confiance du public dans les systèmes automatisés et connectés. Cela implique la mise en œuvre de mesures de vérification robustes, de protocoles de gestion des risques et de mécanismes de contrôle de la qualité pour garantir que les CPS respectent les normes de vérification les plus élevées.

Dans notre proposition, nous utilisons les jumeaux numériques comme couche de vérification. Cela nous permet de surveiller, de détecter, et de prévenir les incidents susceptibles de compromettre la vérification du système. Les jumeaux numériques facilitent la simulation avancée et l'analyse prédictive des opérations, nous permettant d'identifier les risques potentiels et de mettre en œuvre des mesures préventives pour protéger les systèmes CPS.

Pour atteindre notre objectif, notre solution repose sur la conception d'un module de vérification capable de vérifier les contraintes de vérification, où les analystes systèmesont assistés dans la définition de ces contraintes via un éditeur dédié.

L'architecture fonctionnelle proposée est représentée dans le diagramme de cas d'utilisation présenté dans la figure (III.3).

Le diagramme de cas d'utilisation représente les fonctions générales de notre système et les interactions entre le système et ses acteurs. Notre architecture comprend cinq acteurs :

1. **Analyste CPS :** Responsable de définir, d'activer, de désactiver et de vérifier les contraintes de sécurité en temps réel.

2. **Vérificateur :** un module DT implémenté pour vérifier les contraintes

3. **Système de comptabilité et de journalisation :** un module DT implémenté pourgérer les journaux et les notifications.

5. **CPS :** le système cyber-physique.

6. **Utilisateur CPS :** un utilisateur ayant la capacité de consulter et de recevoir des notifications si les contraintes ne sont pas vérifiées, ainsi que de vérifier les contraintes en temps réel.

Nous présentons les différents cas d'utilisation identifiés dans le diagramme de cas d'utilisation comme suit :

- **Définition des contraintes :** l'analyste CPS peut définir des contraintes pour divers composants CPS.
- **Vérification des contraintes :** les contraintes peuvent être vérifiées en temps réel par l'analyste CPS, et également automatiquement par le vérificateur.
- **Notification :** si les contraintes ne sont pas vérifiées, le module vérificateurde envoie une alerte à l'administrateur utilisateur CPS.
- **Mise à jour des objets :** le système physique transmet systématiquement des informations sur les composants à son jumeau numérique (DT), y compris toutesles modifications apportées aux composants CPS.

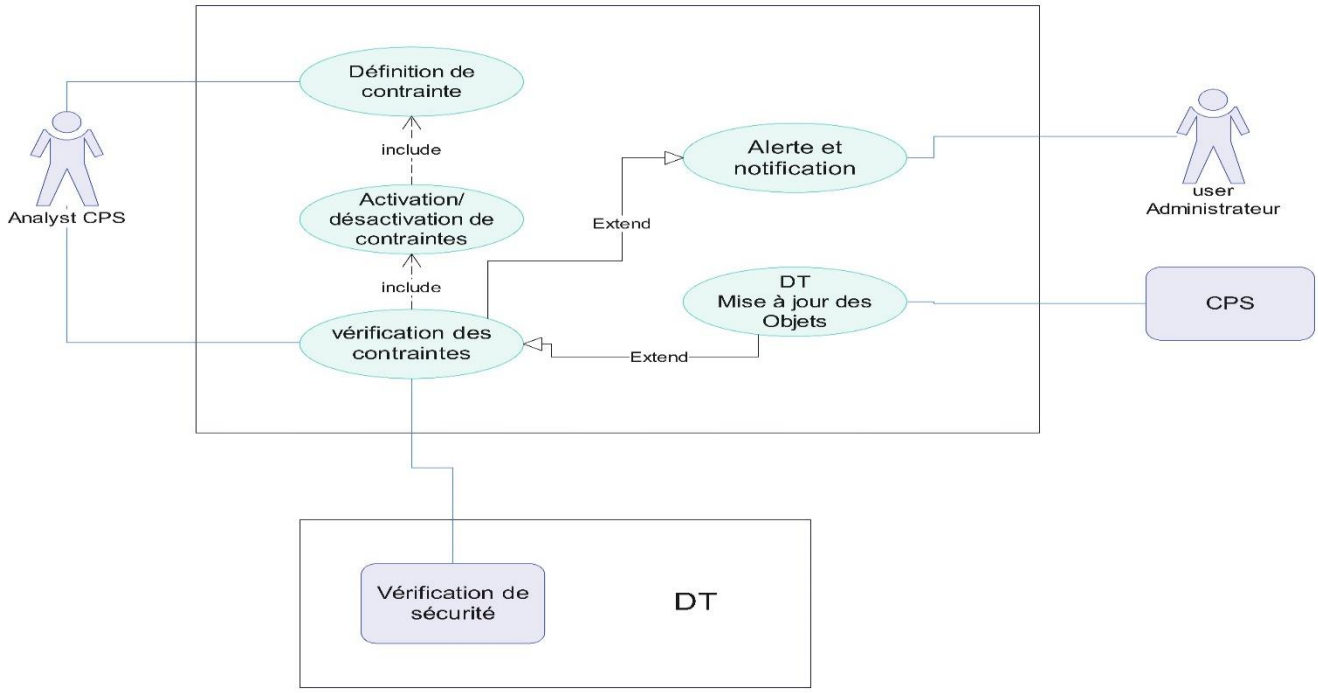


Figure 11: Diagramme de cas d'utilisation

III.3.1 Définition des contraintes

Pour faciliter l'établissement des contraintes de vérification par l'analyste système, nous proposons l'introduction d'un langage destiné à aider à la spécification de ces contraintes.

Les contraintes sont structurées pour fournir une expression claire et concise des conditions devant être satisfaites

Cette grammaire permet la définition structurée des contraintes de sécurité en utilisant des opérateurs logiques et mathématiques pour spécifier les relations entre les éléments du système.

L'analyste utilise l'éditeur de contraintes pour définir les contraintes de sécurité à suivre. Ces contraintes peuvent être définies pour plusieurs éléments. Le processus de définition et d'activation des contraintes est illustré dans le diagramme de séquence présenté dans la Figure III 4.

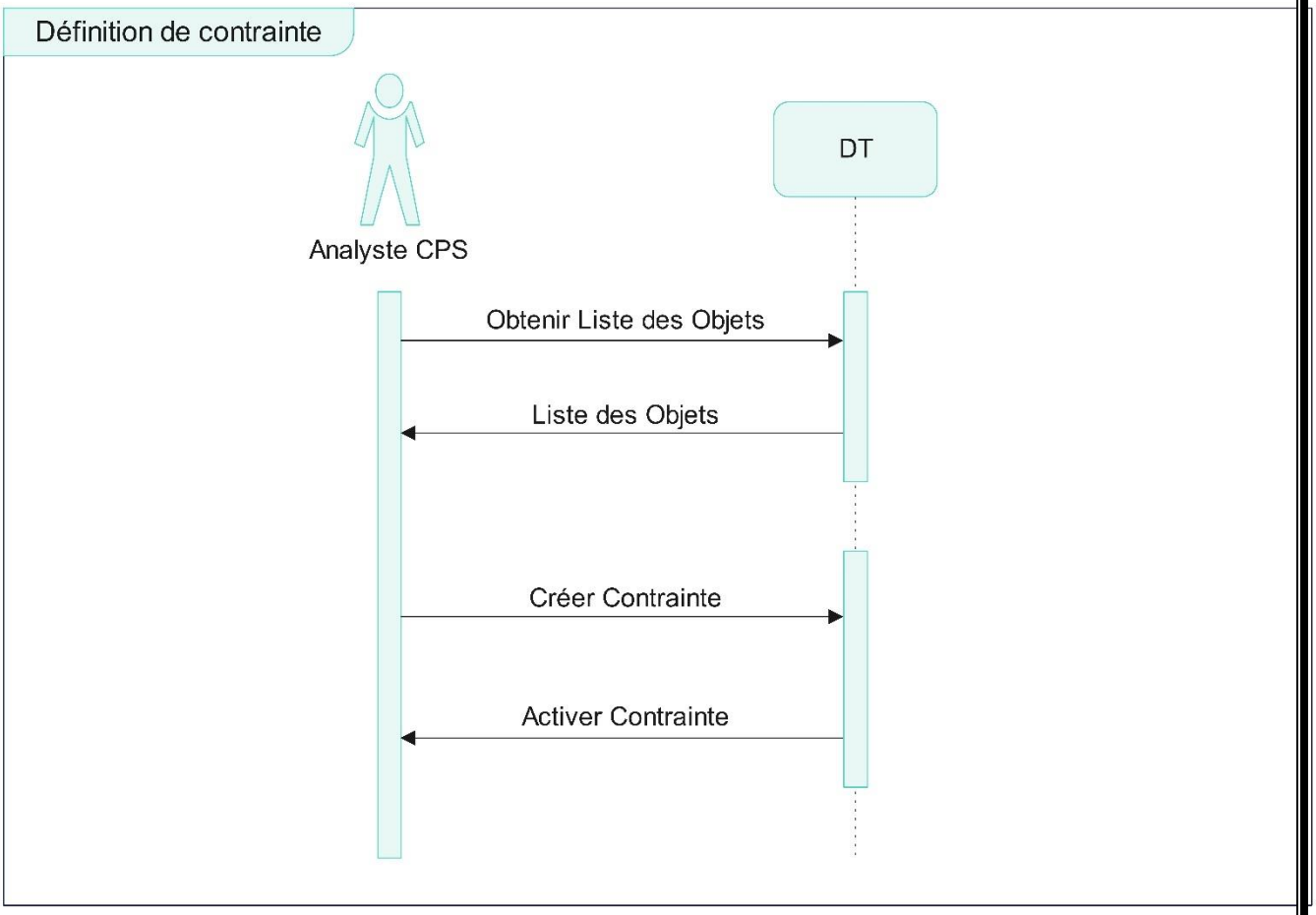


Figure 12:diagramme de séquence définition des contraintes

➢ Vérification des contraintes

La détection des comportements anormaux dans les systèmes cyber-physiques est cruciale pour garantir leur bon fonctionnement et la vérification des processus industriels. La capacité à identifier les schémas de fonctionnement déviant de la norme permet la détection rapide d'incidents potentiels, la prévention des défaillances et l'amélioration de la fiabilité opérationnelle.

Pour atteindre cet objectif, nous renforçons le jumeau numérique avec un module de vérification de la sécurité. Nous définissons deux modes de fonctionnement :

- Vérification en temps réel : initiée sur demande de l'analyste CPS.
- Vérification systématique : effectuée lors de la mise à jour du système.

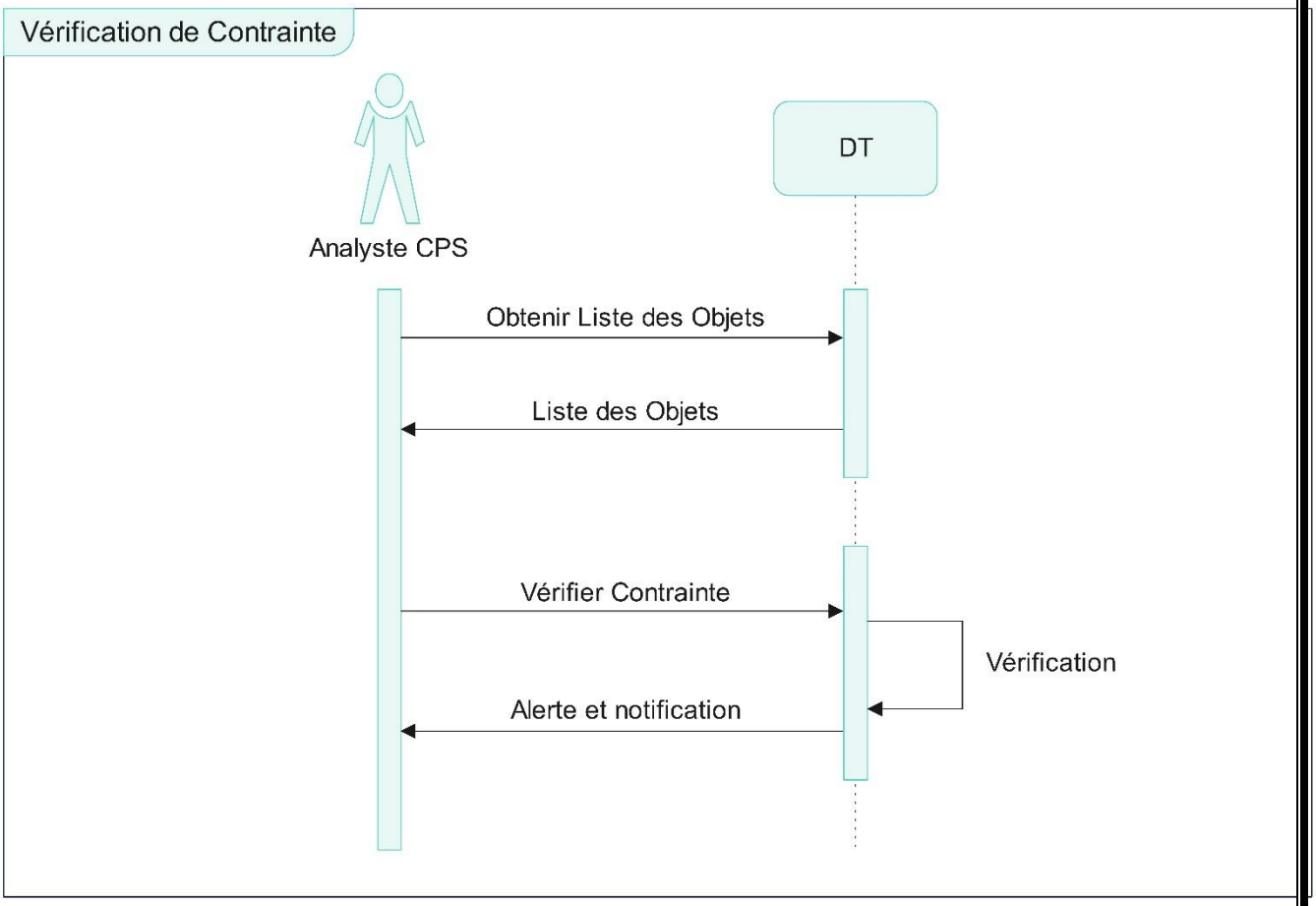


Figure 13:diagramme de séquence vérification des contraintes

III.4 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous nous sommes lancés dans la conception et le développement d'une solution innovante exploitant les jumeaux numériques pour garantir la surveillance et le bon fonctionnement des systèmes cyber-physiques. Cette entreprise nous a amenés à définir des contraintes spécifiques visant à détecter les comportements indésirables au sein des SCP. En adoptant une approche basée sur les jumeaux numériques, nous avons pu fournir une solution robuste et efficace pour prévenir les incidents, assurer la vérification opérationnelle et maintenir la fiabilité des systèmes connectés. La mise en œuvre de cette solution a jeté les bases d'une gestion proactive des risques et d'une amélioration continue des performances des systèmes cyber-physiques, contribuant ainsi à renforcer la confiance dans ces technologies essentielles. L'implémentation de la solution proposée sera présentée dans le chapitre suivant.

IV Chapitre IV : Implémentation

IV.1 Introduction

Le chapitre IV explore la mise en œuvre pratique d'un jumeau numérique qui relie l'aspect réel et hypothétique de l'apport d'informations avec la couche dite de connectivité et le développement de l'application souhaitable, qui sont deux éléments essentiels pour que l'utilisateur puisse suivre les conditions de fonctionnement de sa chambre froide.

Le chapitre commence par une présentation détaillée de l'environnement et des outils de développement utilisés dans notre recherche, puis se concentre sur la mise en œuvre et la simulation de la couche de livraison en utilisant Eclipse ditto qui est une plate-forme puissante pour gérer les jumeaux numériques dans des environnements iot. Nous surveillons et vérifions en temps réel les conditions de la chambre froide, y compris la présence de notifications lors de la détection des erreurs. Ensuite, nous nous penchons sur le développement de l'application souhaitée qui fonctionne selon les conditions déterminées par l'utilisateur pour assurer le bon fonctionnement de la chambre froide et maintenir l'environnement de stockage requis. Les utilisateurs peuvent déterminer les bandes acceptables de température, de pliabilité et de performance de l'équipement que l'application utilise pour vérifier en permanence l'état actuel de la chambre froide. Lorsqu'un paramètre s'écarte des conditions spécifiques, le système jumeau numérique lance immédiatement des alertes, permettant une intervention immédiate pour corriger tout problème.

Cette approche proactive aide à prévenir les dommages potentiels aux marchandises stockées et garantit que la chambre froide est exploitée efficacement et en toute sécurité à toutmoment. Ce chapitre explore la mise en œuvre pratique de la couche delivraison et le développement de l'application WAP tout en soulignant son importance dans la surveillance et la vérification en temps réel des conditions de la chambre froide.

IV.2 La structure globale avec des jumeaux numériques

La configuration proposée se compose de deux parties principales : la section physique et la section des jumeaux numériques. Dans la section physique, nous rassemblons le système cyber physique réel et ses composants physiques. Pendant ce temps, dans la section des jumeaux numériques, nous disposons d'une représentation numérique du SCP appelée "double numérique". Ce jumeau numérique contrôle activement le comportement du SCP en temps réel et surveille tout comportement indésirable dans les composants du SCP

IV.2.1 Environnement et outils de développement

IV.2.1.1 Eclipse ditto

Eclipse Ditto™ est un Framework permettant de fournir le modèle « Digital Twin » pour les applications IoT afin d'interagir avec les appareils IoT.

Cela signifie que Ditto reflète les appareils physiques sous forme de représentations numériques dans le cloud.

En tant que développeur d'applications Web ou mobiles, vous pouvez interagir avec ces jumeaux numériques comme s'il s'agissait de n'importe quel autre service Web. C'est pourquoi Ditto permet un paradigme « appareil en tant que service ».

Quelques-unes des principales fonctionnalités sont le contrôle d'accès, une recherche sur toutes les données jumelles et les notifications...

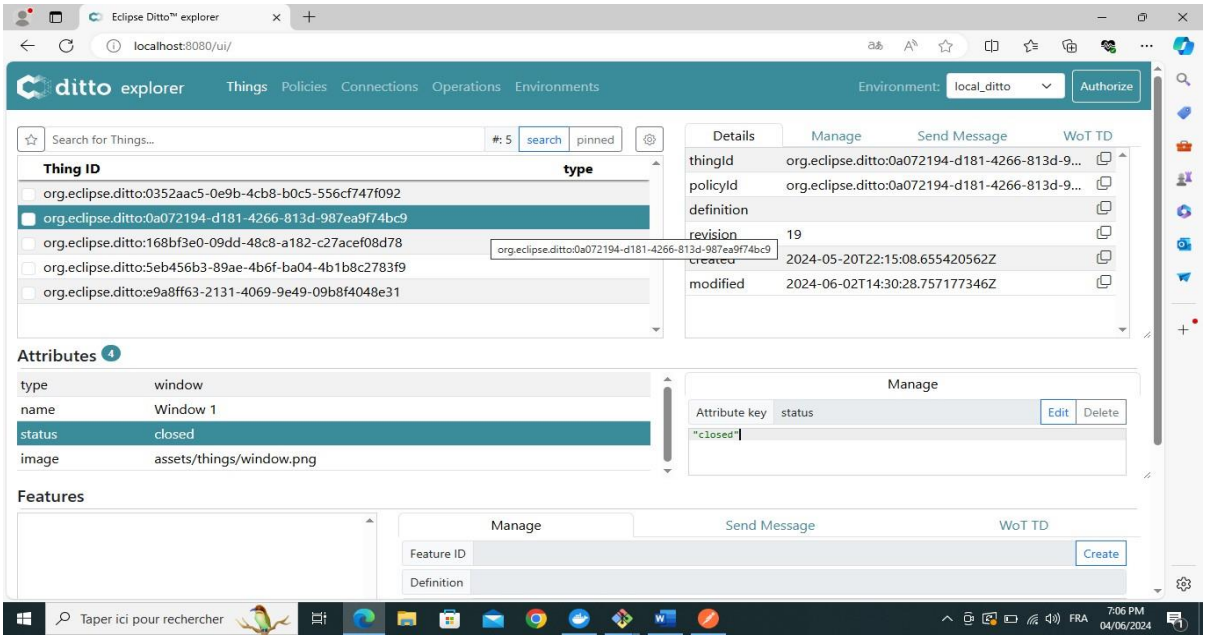


Figure 14:liste des objet

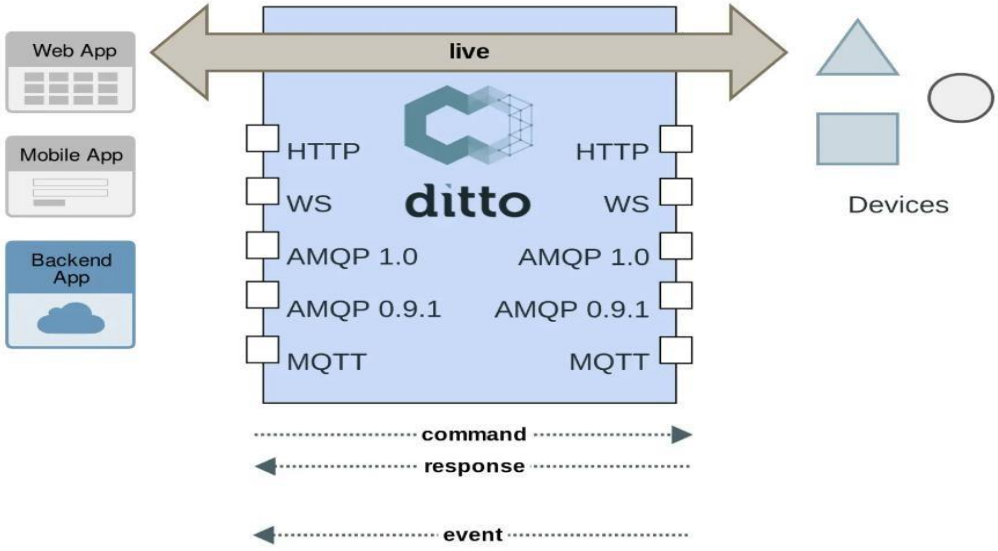


Figure 15:fonctionnalité de ditto

IV.2.1.2 Docker

Docker est une plateforme logicielle qui vous permet de créer, tester et déployer rapidement des applications. Docker regroupe les logiciels dans des unités standardisées appelées conteneurs qui contiennent tout ce dont le logiciel a besoin pour fonctionner Notamment les bibliothèques, les outils système, le code et le runtime. Grâce à Docker, vous pouvez rapidement déployer et faire évoluer des applications dans n'importe quel environnement et savoir que votre code s'exécutera.

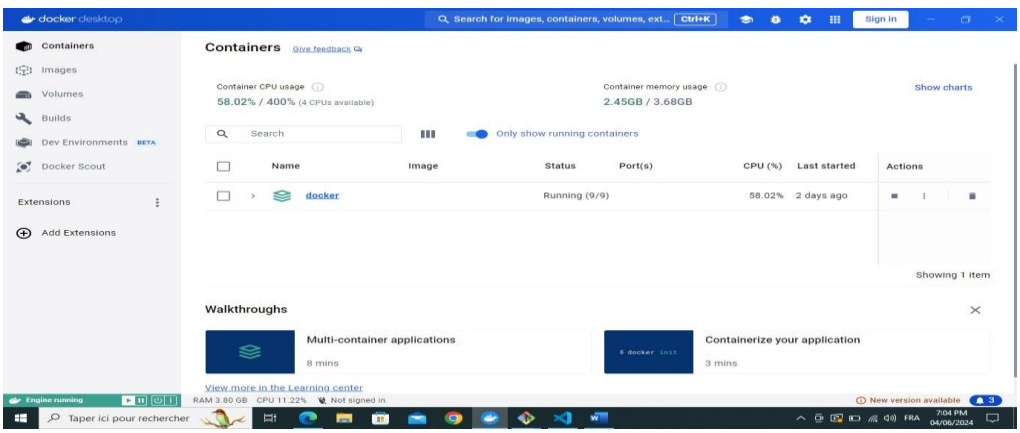


Figure 16:interface docker

Postman utilise des algorithmes de traitement du langage naturel pour simplifier le développement et le test d'API, offrant une interface intuitive et intelligente pour explorer, tester et documenter les fonctionnalités des API de manière efficace et précise.

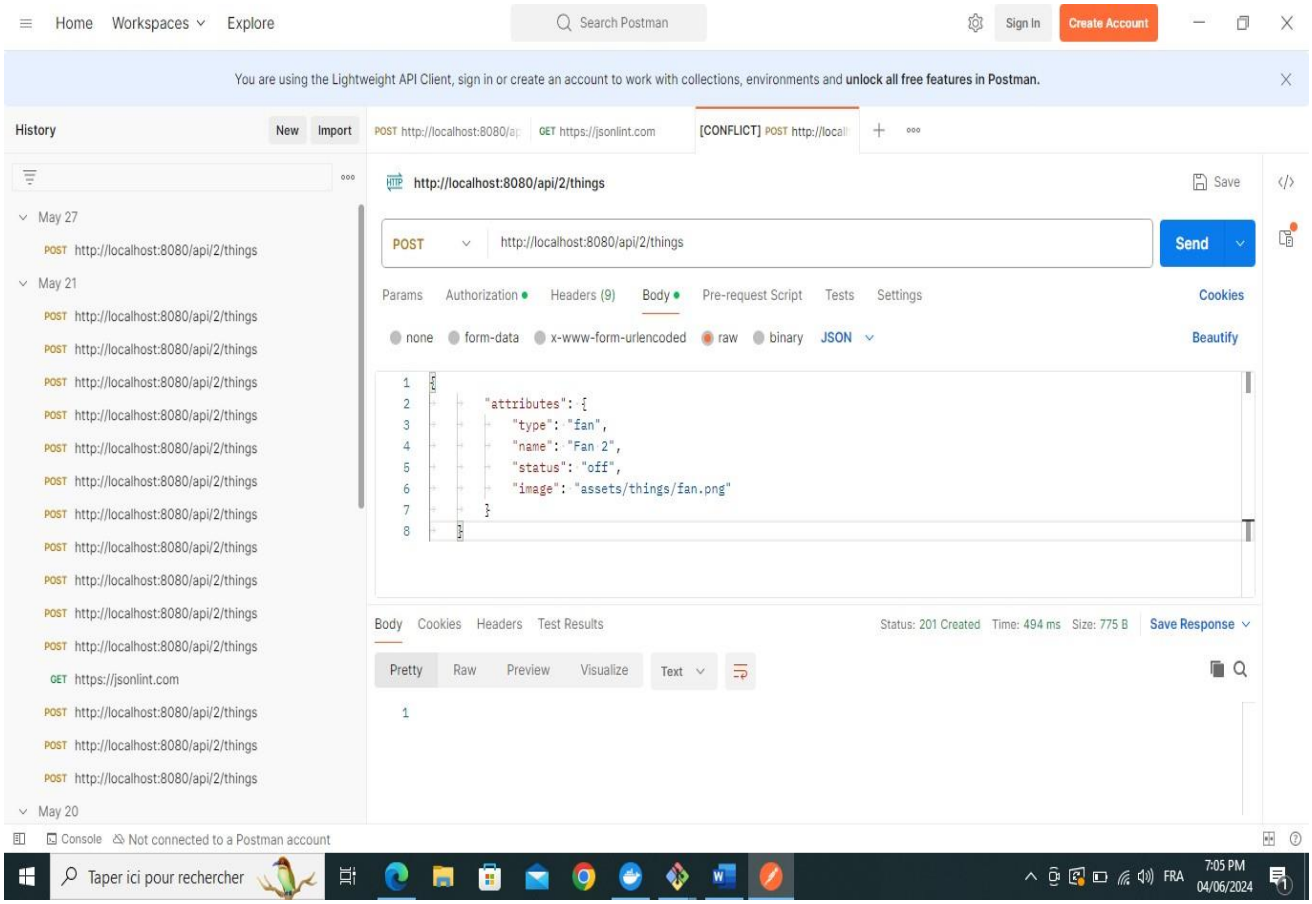


Figure 17:liste choses dans Postman

IV.2.1.3 Flutter (Dart)

Flutter utilise des modèles d'apprentissage profond pour créer des interfaces utilisateurfluides et réactives, offrant ainsi une expérience utilisateur immersive et engageante sur unevariété de plateformes, grâce à une optimisation intelligente des performances et des animations.

IV.2.1.4 VS Code

Visual Studio Code intègre des fonctionnalités d'analyse de code avancées basées sur l'IApour améliorer la productivité des développeurs, en offrant des suggestions contextuelles, une détection d'erreurs en temps réel et une personnalisation intelligente de l'expérience de développement.

IV.3 Création d'un Jumeau Numérique pour les CPS

Pour illustrer la vérification que nous proposons en se basant sur les jumeaux numériques, nous considérons le cas d'étude présenté en chapitre conception, Section **III.3.**

Après la construction du modèle jumeau numérique pour notre CPS de la chambre froide, nous implémentons ce modèle dans la plateforme Eclipse ditto. Le résultat sera un fichier en format Json comme décrit dans la figure 17

Ce jumeau numérique servira de réplique virtuelle précise de la chambre froide physique, permettant ainsi d'analyser, de tester et d'optimiser différents scénarios opérationnels sans risquer de perturber l'environnement réel. En utilisant des capteurs et des données en temps réel, le jumeau numérique peut être constamment mis à jour pour refléter avec précision les conditions et les performances de la chambre froide, offrant ainsi un outil puissant pour la surveillance et la gestion efficace des ressources.

```
{
    "thingId": "org.eclipse.ditto:0036c3f1-192f-408f-b89d-fa95daffcf33",
    "policyId": "org.eclipse.ditto:0036c3f1-192f-408f-b89d-fa95daffcf33",
    "attributes": {
        "type": "ac",
        "name": "Climatiseur",
        "minTemp": 0,
        "maxTemp": 25,
        "currentTemp": 34
    }
},
{
    "thingId": "org.eclipse.ditto:0352aac5-0e9b-4cb8-b0c5-556cf747f092",
    "policyId": "org.eclipse.ditto:0352aac5-0e9b-4cb8-b0c5-556cf747f092",
    "attributes": {
        "type": "door",
        "status": "open"
    }
},
{
    "thingId": "org.eclipse.ditto:0a072194-d181-4266-813d-987ea9f74bc9",
    "policyId": "org.eclipse.ditto:0a072194-d181-4266-813d-987ea9f74bc9",
    "attributes": {
        "type": "window",
        "name": "Window 1",
        "status": "closed",
        "image": "assets/things/window.png"
    }
},
{
    "thingId": "org.eclipse.ditto:168bf3e0-09dd-48c8-a182-c27acef08d78",
    "policyId": "org.eclipse.ditto:168bf3e0-09dd-48c8-a182-c27acef08d78",
    "attributes": {
        "type": "temp",
        "name": "Temp 1",
        "minTemp": 0,
        "maxTemp": 10,
        "currentTemp": 10,
        "image": "assets/things/temp.png"
    }
},
{
    "thingId": "org.eclipse.ditto:5eb456b3-89ae-4b6f-ba04-4b1b8c2783f9",
    "policyId": "org.eclipse.ditto:5eb456b3-89ae-4b6f-ba04-4b1b8c2783f9",
    "attributes": {
        "type": "fan",
        "name": "Fan 1",
        "status": "low speed",
        "image": "assets/things/fan.png"
    }
```


Figure 18:la forme de json

Web application

Dans la section dédiée à l'application mobile, nous présentons un aperçu complet de l'interface utilisateur développée pour notre système. L'application mobile agit comme le composant utilisateur, offrant une plateforme intuitive et interactive conçue à l'aide de Flutter (Dart) pour que les utilisateurs puissent accéder et utiliser les fonctionnalités du système. Elle comprend des fonctionnalités telles que l'authentification utilisateur , Figure **18**.

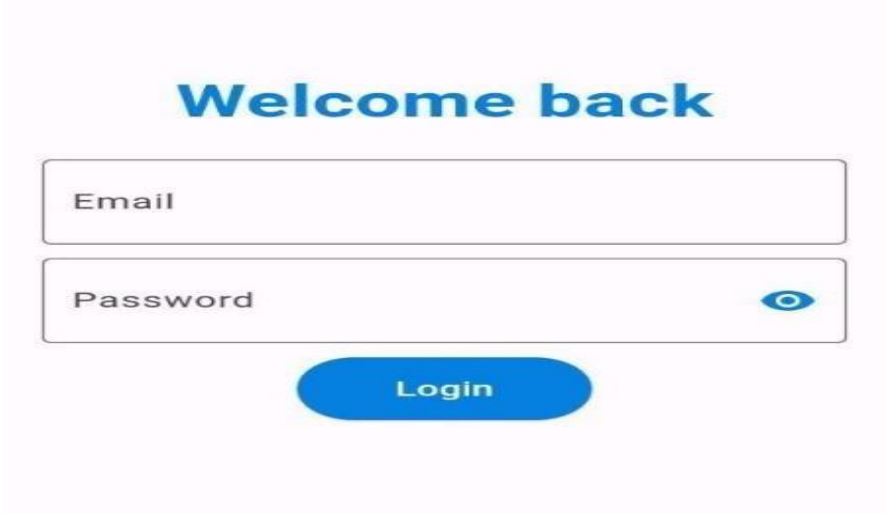


Figure 19:interface de login

L'authentification des utilisateurs consiste à vérifier l'identité des utilisateurs avant de leur donner accès aux fonctionnalités et aux ressources de l'application.

- **Liste des objets :**



Figure 20:interface d'application

IV.4 Définition des contraintes

Après avoir simulé le jumeau numérique de notre CPS, l'analyste du CPS utilise l'éditeur de contraintes illustré dans la figure **20** pour définir plusieurs contraintes afin d'assurer la vérification et l'efficacité de l'opération. Ces contraintes sont nécessaires pour garantir la sécurité du CPS de la chambre froide.

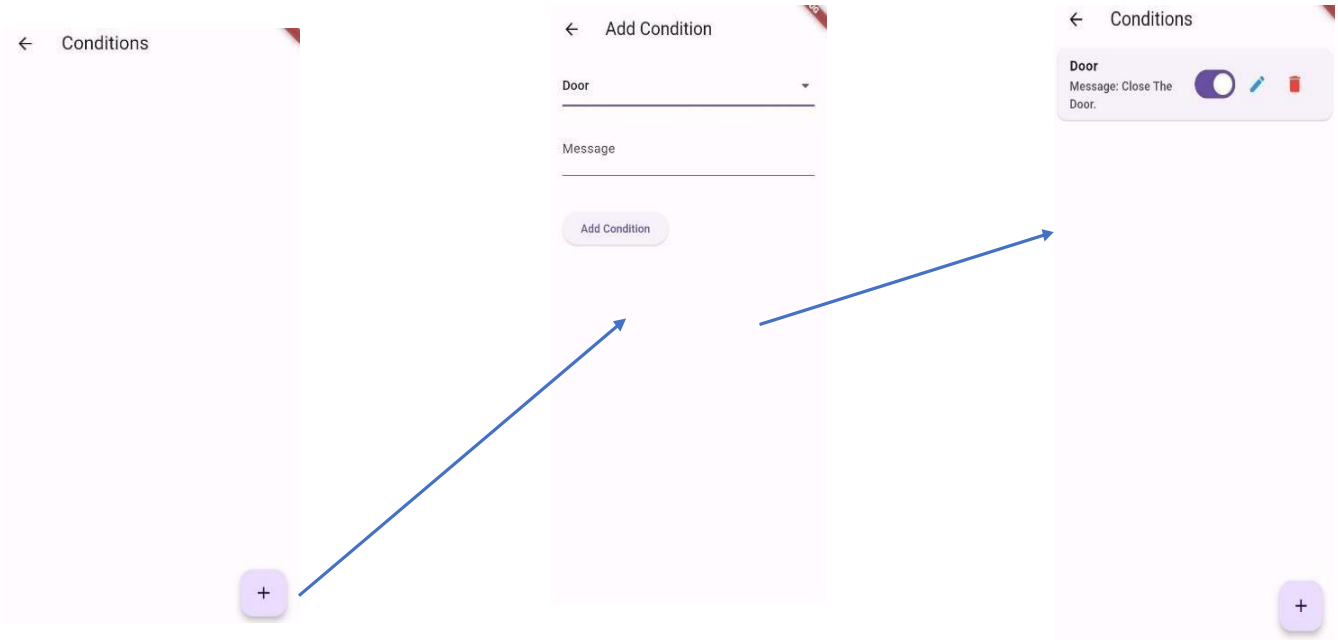


Figure 21: Ajouter une contrainte

Ces contraintes sont systématiquement vérifiées à l'aide du module de vérification de sécurité à chaque fois qu'une modification intervient dans un composant du CPS lié à ces contraintes.

Dans notre exemple, nous définissons quatre contraintes comme suit **:**

- C1 : Cette contrainte précise que le porte de la chambre est fermé
- C2 : cette contrainte précise que la température de la chambre entre max = 10, min = 0
- C3 : cette contrainte précise que la ventilateur de la chambre est (high speed ou low speed)
- C4 : cette contrainte précise qu'humidité > 60% et ventilateur = haigh speed

Ces contraintes joueront par la suite un rôle crucial dans l'évaluation du comportement denotre système.

IV.5 Vérification des contraintes

Pour illustrer la vérification des contraintes de vérification du SCP, nous supposons que le SCP de la chambre froide est synchronisé avec son jumeau numérique. Cela est réalisé en activant le processus de simulation, où nous considérons les mises à jour dans divers composants du SCP tels que la température et l'humidité. Ensuite, nous observons la réaction de notre système.

La vérification des contraintes son présentés la Figure **21**

Les résultats de détection sont présentés dans la Figure **22**.

```
if (thing is Temp && conditions.containsKey("Temp")) {
  String errorMessage = conditions["Temp"]!.message;
  if (conditions["Temp"]!.active && (thing.currentTemp < conditions["Temp"]!.min || thing.currentTemp > conditions["Temp"]!.max)) {
    if (!loggedErrors.containsKey(errorMessage)) {
      loggedErrors[errorMessage] = DateTime.now();
      newErrors.add('${DateFormat('HH:mm:ss').format(DateTime.now())} $errorMessage');
    }
  } else if (loggedErrors.containsKey(errorMessage)) {
    resolvedErrors.add(errorMessage);
  }
}

if (thing is Fan && conditions.containsKey("Fan")) {
  String errorMessage = conditions["Fan"]!.message;
  if (conditions["Fan"]!.active && thing.status != conditions["Fan"]!.status) {
    if (!loggedErrors.containsKey(errorMessage)) {
      loggedErrors[errorMessage] = DateTime.now();
      newErrors.add('${DateFormat('HH:mm:ss').format(DateTime.now())} $errorMessage');
    }
  } else if (loggedErrors.containsKey(errorMessage)) {
    resolvedErrors.add(errorMessage);
  }
}
```

Figure 22:vérification des contraintes

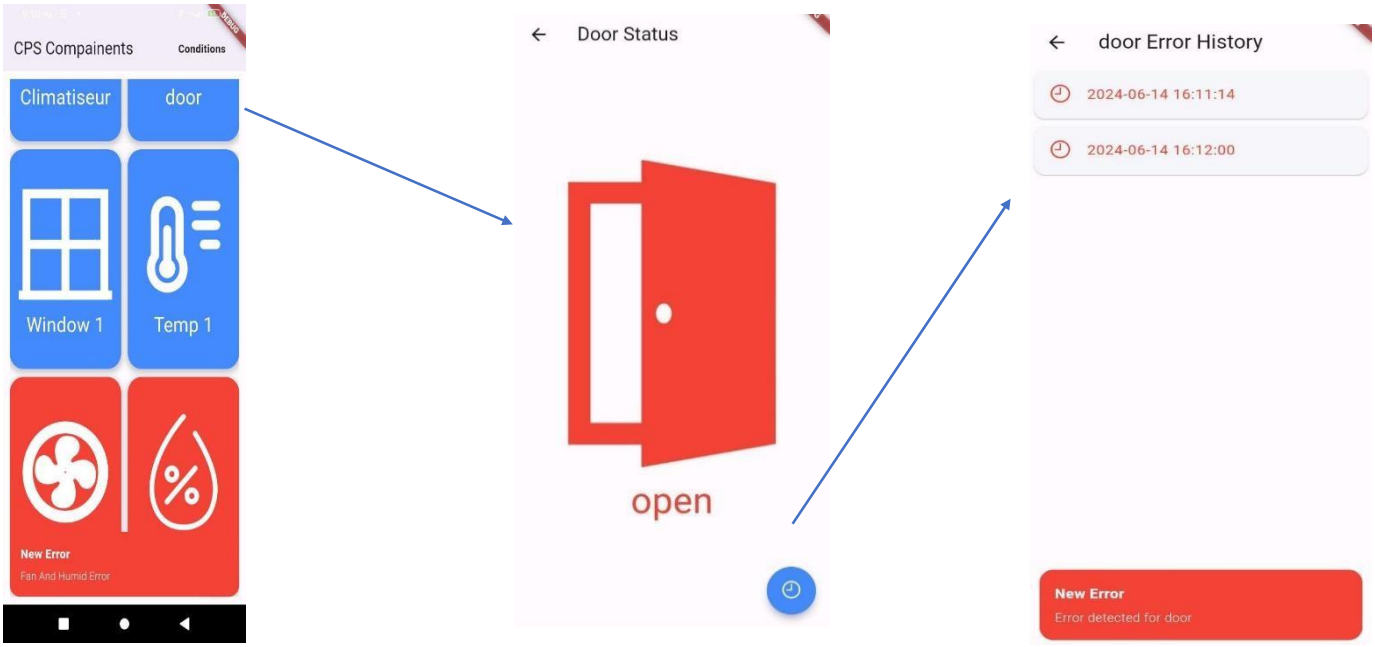


Figure 23:les résultats de vérification

IV.6 Conclusion

Le chapitre IV montre la mise en œuvre pratique de la couche de liaison et le développement de l'application web dans notre système IOT. Et grâce à la surveillance immédiate des conditions de la chambre froide et des notification incisives en cas de défaut. Tous ces composants jouent un rôle crucial dans la vérification et le maintien de l'environnement de stockage requis par l'utilisateur. Et en vérifiant les valeurs des objets sur lesquelles nous travaillons à l'intérieur de la chambre froide. Il fait de notre système un environnement sain qui nous assure la continuité normale des produits à l'intérieur. Les conditions de la chambre froide sont générales. L'intégration réussie de ces éléments le rend plus proche de cela en vérifiant le temps de mise en œuvre dans le jumeau numérique des systèmes cyber physiques.

Conclusion générale

Conclusion générale

En résumé, le concept du jumeau numérique représente un changement radical dans notre manière d'appréhender et d'interagir avec les systèmes physiques, en offrant une représentation virtuelle précise et dynamique de ces systèmes. Les jumeaux numériques jouent un rôle crucial dans l'amélioration de la gestion des systèmes cyber-physiques en fournissant une plateforme interactive pour évaluer les comportements du système et atténuer les erreurs potentielles.

Notre étude s'est focalisée sur l'utilisation des jumeaux numériques pour développer une application avancée de suivi pour les CPS, visant à assurer un fonctionnement fiable en détectant et en traitant les comportements anormaux en temps réel. À cette fin, nous avons élaboré un modèle sophistiqué de jumeau numérique capable de reproduire avec précision le comportement du système physique et d'identifier les écarts par rapport aux normes attendues.

Le résultat de nos efforts est une application complète de suivi et de vérification des CPS, alimentée par la technologie des jumeaux numériques. Cette application fournit aux opérateurs des informations en temps réel sur le comportement du système.

En développant une application web dédiée à la vérification des chambres froides, nous avons conçu une interface intuitive permettant aux utilisateurs de surveiller les conditions critiques à distance. À travers cette plateforme, les utilisateurs peuvent visualiser ces données en temps réel.

Pour l’avenir, nous envisageons de fournir des analyses en tenant compte des corrélations et de l’intégration des services d’analyse de l’IA pour la détection des anomalies. Cela renforcera les capacités de notre application de vérification des CPS, nous permettant de créer une nouvelle génération de plateformes numériques jumelées. Cette plateforme ne se contentera pas de détecter les anomalies, mais les vérifiera également de manière proactive, assurant ainsi la résilience et la fiabilité des systèmes cyber-physiques dans un environnement en constante évolution.

Les références bibliographiques

II. Références

[1] pp. M. V. J. Grieves, “Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems,” 2017..

[2] pp. S. Gamache, «tratégies de mise en oeuvre de l’industrie 4.0 dans les petites et moyennes entreprises manufacturières québécoises.,» 2019..

[3] pp. Y. Lu, C. Liu, I. Kevin, K. Wang, H. Huang and X. Xu, "Digital twin-driven smart manufacturing: Connotation reference model applications and research issues", Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, vol. 61, pp. 101837, 2020.(10).

[4] pp. Stankovic, J. A. (2017). Research directions for cyber physical systems in wireless and mobile healthcare. ACM Transactions on Cyber-Physical Systems, 1(1), 1–12..

[5] pp. A. Bicaku, S. Maksuti, C. Hegedús, M. Tauber, J. Delsing and J. Eliasson, "Interacting with the arrowhead local cloud: On-boarding procedure", 2018 IEEE industrial cyber-physical systems (ICPS). IEEE, pp. 743-748, 2018.(13).

[6] pp. Gabor, T.; Belzner, L.; Kiermeier, M.; Beck, M.T.; Neitz, A. A simulation-based architecture for smart cyber-physical systems. In Proceedings of the 2016 IEEE International Conference on Autonomic Computing (ICAC), Wuerzburg, Germany, 17–22 July 2016; pp..

[7] pp. “Cyber-Physical Systems Week” [Online]. Available: http://www.cpsweek.org/ [Accessed: May. 1, 2020]..

[8] pp. Broll, G., Rukzio, E., Paolucci, M., Wagner, M., Schmidt, A., & Hussmann, H. (2009). Perci: pervasive service interaction with the internet of things. IEEE Internet Computing, 13(6), 74–81.(18).

[9] pp. Atzori, L., Iera, A., & Morabito, G. (2011). SIoT: giving a social structure to the internet of things. IEEE Communication Letters, 15(11), 1193–1195.(16).

[10] pp. Vermesan, O., et al. (2009). Internet of things – Strategic research roadmap. European Commission-Information Society and Media DG.(22).

[11] pp. Kortuem, G., et al. (2010). Smart objects as the building block for the internet of things. IEEE Internet Computing, 2010, 44–50.(21).

[12] pp. L. Monostori et al., “Cyber-physical systems in manufacturing,” CIRP Annals, vol. 65, no. 2, pp. 621–641, Jan. 2016, doi: 10.1016/j.cirp.2016.06.005.(23).

[13] pp. Bi, Z., Xu, L., & Wang, C. (2014). Internet of Things for enterprise systems of modern manufacturing. IEEE Transactions on Industrial Informatics. (17).

[14] pp. J. Otto, S. Henning, and O. Niggemann, “Why Cyber-physical Production Systems Need a Descriptive Engineering Approach – A Case Study in Plug & Produce,” Procedia Technology, vol. 15, pp. 295–302, Jan. 2014, doi: 10.1016/j.protcy.2014.09.083.(24).

[15] pp. Chi, Q., Yan, H., Zhang, C., Pang, Z., & Xu, L. (2012). A reconfigurable smart sensor interface for industrial WSN in IoT environment. IEEE Transactions on Industrial Informatics.(20).

[16] pp. Cai, H., Xu, L., Xu, B., Xie, C., Qin, S., & Jiang, L. (2014). IoT-based configurable information service platform for product lifecycle management. IEEE Transactions on Industrial Informatics(19).

[17] pp. A. Parant, F. Gellot, P. Alexandre, and V. Carré-Ménétrier, “Model-based Engineering for Designing Cyber-Physical Systems Control Architecture and Improving Adaptability from Requirements,” Cluny, France, 2021. [Online].(25).

[18] pp. MarketsandMarkets. Digital Twin Market by Technology, Type (Product, Process, and System), Application (Predictive Maintenance, and Others), Industry (Aerospace & Defense, Automotive & Transportation, Healthcare, and others), and Geography—Global Forecast.

[19] pp. Volodin, V.; Tolokonskii, A. Concept of instrumentation of digital twins of nuclear power plants units as observers for digital NPP I&C system. J. Phys. Conf. Ser. 2019, 1391, 012083. (35).

[20] pp. Canedo, A. Industrial IoT lifecycle via digital twins. In Proceedings of the Eleventh IEEE/ACM/IFIP International Conference on Hardware/Software Codesign and System Synthesis, Pittsburgh, PA, USA, 2–7 October 2016; p. 1.(36).

[21] pp. H. Kagermann, W. Wahlster and J. Helbig, "Securing the future of german manufacturing industry: Recommendations for implementing the strategic initiative industrie 4.0", Industrie, vol. 4, 2013. (8).

[22] pp. A. Aziz, O. Schelén and U. Bodin, "Digital twin as a proxy for industrial cyber-physical systems", International Conference on Industrial Technology and Management, 2022.(11).

[23] pp. The eclipse arrowhead project, [online] Available: https://www.arrowhead.eu/.(26).

[24] pp. Parrott, A.; Warshaw, L. Industry 4.0 and the Digital Twin: Manufacturing Meets its Match; Deloitte University Press: New York, NY, USA, 2017; pp. 1–17. (31).

[25] pp. A.K. Jain, S. Prabhakar and S. Chen, "Combining Multiple Matchers for a High Security Fingerprint Verification System", Pattern Recognition Letters, vol. 20, no. 11, pp. 1371-1379, 1999.(15).

[26] pp. Haque, S. A., Aziz, S. M., & Rahman, M. (2014). Review of cyber-physical system in healthcare. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2014..

[27] pp. J. Deng, Q. Zheng, G. Liu, J. Bai, K. Tian, C. Sun, Y. Yan, Y. Liu.

[28] pp. Demkovich, N.; Yablochnikov, E.; Abaev, G. Multiscale modeling and simulation for industrial cyber-physical systems. In Proceedings of the 2018 IEEE Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS), St. Petersburg, Russia, 15–18 May 2018; pp. 291–296. (34).

[29] pp. B. Stroustrup, «Programming: Principles and Practice Using C++. Addison- Wesley Professional.,»

2013..

[30] pp. Tao, F.; Zhang, M.; Nee, A.Y.C. Chapter 2—Applications of Digital Twin. In Digital Twin Driven Smart Manufacturing; Tao, F., Zhang, M., Nee, A.Y.C., Eds.; Academic Press: Cambridge, MA, USA, 2019; pp. 29–62(29).

[31] pp. Kritzinger, W.; Karner, M.; Traar, G.; Henjes, J.; Sihn, W. Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. IFAC-PapersOnLine 2018, 51, 1016–1022.(30).

[32] pp. P. S. R. &. Collerette et M. Lauzier, «Le pilotage du changement. (S.l.) :,» 2012..

[33] pp. J. M. &. Hiatt et T. J. Creasey, «An introduction to change management from the editors of the Change Management Learning Center,» 2012..

[34] pp. R. W. Sebesta, «Concepts of Programming Languages. Pearson,» 2015..

[35] pp. J. &. Smith et A. Johnson, «Utilisation des jumeaux numériques pour la simulation et l'optimisation des systèmes de production,» Journal of Digital.

[36] pp. E. A. Lee, "Cyber physical systems: Design challenges", 2008 11 th IEEE international symposium on object and componentoriented real-time distributed computing (ISORC). IEEE, pp. 363-369, 2008.(9).

[37] pp. Tao, F.; Zhang, M.; Nee, A.Y.C. Chapter 1—Background and Concept of Digital Twin. In Digital Twin Driven Smart Manufacturing; Tao, F., Zhang, M., Nee, A.Y.C., Eds.; Academic Press: Cambridge, MA, USA, 2019; pp. 3–28. (32).