REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA

Faculté de **T**echnologie

Département du **G**énie **E**lectrique

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : Électronique

Spécialité : Électronique des systèmes embarqués

Conception d'un système de gestion intelligent des serres agricoles à base d'un jumeau numérique

---

Présenté par :

ASLI Abdallah

BOUTRIG Nacer

Proposé et Dirigé par :

Dr.BENYEZZA Hamza

Pr.BOUHEDDA Mounir

Promotion 2023

Travail préparé au sein du Laboratoire des Systèmes Électroniques Avancés (LSEA)

de l'Université de Médéa, ALGÉRIE

Remerciement

Nous remercions tout d'abord, ALLAH qui nous a donné la force, le courage, la volonté et la patience de mener

à terme ce présent travail.

Nous remercions aussi Dr. BENYEZZA Hamza,

Et Pr. BOUHEDDA Mounir

Les encadreurs de ce mémoire, pour leurs aide ses conseils

appréciables et ses encouragements à travers son attention, sa patience.

Un grand merci à tous les membres du jury

pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail.

Monsieur TAKDJOUT Amine, et tous les gens de prés et de loin qui ont aidé à l'élaboration de ce sujet et à tous

nos professeurs et travailleurs de l'université

YAHIA FARES MEDEA.

Enfin, nos chers parents et familles, nous leurs présentons

L'expression de nos remerciements les plus sincères et les plus profonds en reconnaissance de leurs sacrifices, aides, soutien et encouragement afin de nous assurer cette formation de Master dans

les meilleures conditions.

Dédicace

J'ai l'honneur de dédier ce modeste travail à :

Mes chers parents qui ont été là pour moi durant toute ma vie ;

Ma chère femme,

et mes deux chers fils, Mouad et Moussaab ;

Mes frères et ma sœur ;

Pour tous les membres de la famille ASLI, sans exception.

A mes amis ;

A tous ceux qui m'aiment ;

A tous les professeurs et enseignants qui ont collaboré à mes études.

A tous ceux qui m'ont aidé durant ma vie universitaire.

ASLI Abdallah

Dédicace

À ma chère maman, sans qui je n 'aurais pas été ce que je suis aujourd 'hui. Tout mon amour pour toi.

A mes frères et mes sœurs

A Monsieur TAKDJOUT Amine qui nos aide dans notre travail

A toutes mes amis

Youcef Youssouf Salah Fouad Sidali Abdo

Raouf Monir Miloud Mokhtar Nadjib

A tous les professeurs et les enseignants qui ont collaboré à ma formation depuis mon premier cycle d'étude jusqu 'à la fin de mes études universitaires.

A tous ceux qui m 'ont aidé durant ma vie universitaire. A toute la promotion 2023.

Nacer BOUTRIG

الملخص

يهدف مشروع التخرج هذا إلى إنشاء توأم رقمي للإدارة الفعالة للبيئة الزراعية. لهذا الغرض، يتم تثبيت بطاقة إلكترونية (NodeMCU ESP8266) على مستوى البيئة الزراعية ومتصلة بأجهزة استشعار لتجميع المعلمات الزراعية المختلفة، وكذلك المشغلات للتحكم. تسمح البطاقة بنقل البيانات التي تم جمعها إلى سحابة Firebase باستخدام بروتوكول WebSocket، حيث يمكن تخزينها وتحليلها. تم تطوير تطبيق ويب يعتمد على منصة React للسماح للمستخدم بالمراقبة والتحكم عن بُعد. تظهر نتائج الاختبار فعالية النظام المقترح

كلمات مفتاحية : التوأم الرقمي ؛ NodeMCU ESP8266 ؛ Firebase ؛ إنترنت ألاشياء ؛ بروتوكول WebSocket المنصة React

Résume

Ce projet de fin d'études vise à créer un jumeau numérique pour une gestion efficace d'un environnement agricole. Pour cela, une carte électronique (NodeMCU ESP8266) est installée au niveau de l'environnement agricole et connectée à des capteurs pour collecter les différents paramètres agricoles, ainsi qu'à des actionneurs pour le contrôle. La carte permet de transférer les données collectées vers le cloud Firebase en utilisant le protocole WebSocket, où elles peuvent être stockées et analysées. Une application web basée sur la plateforme React a été développée pour permettre à l'utilisateur de surveiller et de contrôler à distance. Les résultats des tests montrent l'efficacité du système proposé

Mots clés : jumeau numérique, NodeMCU ESP8266 , Firebase , IoT , protocole WebSocket , plateforme React.

Abstract

This end-of-studies project aims to create a digital twin for efficient management of an agricultural environment. For this purpose, an electronic board (NodeMCU ESP8266) was installed in the agricultural environment and connected to sensors to collect various agricultural parameters, as well as actuators for control. The board allows transferring the collected data to the Firebase cloud using the WebSocket protocol, where they can be stored and analyzed. A web application based on the React platform was developed to enable remote monitoring and control. The test results demonstrate the effectiveness of the proposed system.

Keywords: digital twin, NodeMCU ESP8266, Firebase, IoT, WebSocket protocol, React platform.

Table de matière

Remerciement I
Dédicace II
Résumé IV
Table de matières V
Liste abréviation VIII
Liste des figures X
Liste des tableau XII
Introduction générale 1

Chapitre 1 : Généralités sur les serres agricoles et l'agriculture intelligente

I.1 Introduction 3
I.2 Serres agricoles 3
I.2.1 Conditions environnementales dans les serres 4
I.2.2 Systèmes de contrôle 5
I.3 Développement de secteur agricole 10
I.4 Agriculture intelligente 11
I.4.1 Définition de l'agriculture intelligente 11
I.4.2 Catégorie de l'agriculture intelligente 12
I.4.3 Technologies de base de l'agriculture 4.0 13
I.4.4 Avantages de l'automatisation des serres 17
I.5 Conclusion 18

Chapitre 2 Jumeau numérique

II.1 Introduction 19
II.2 Jumeau numérique 19
II.3 Présentation générale et fonctionnalité des Jumeaux numériques 21
II.3.1 Modèle numérique/Miroir numérique 22
II.3.2 Ombre numérique 22
II.3.3 Jumeau numérique : naissance du système cyberphysique 23
II.3.4 Jumeau numérique cognitif 23
I.1.1 Jumeau numérique autonome 23
II.4 Types des jumeaux numériques 23
II.4.1 Jumeaux d'actifs 23
II.4.2 Jumeaux système ou jumeaux d'unité 23
II.4.3 Jumeaux de processus 24
II.4.4 Jumeaux de composants 24

II.5 Composants d'un jumeau numérique 24
II.5.1 Capteurs 24
II.5.2 Données 24
II.5.3 Intégration 24
II.5.4 Analytique 24
II.5.5 Actionneurs 24
II.6 Avantages des jumeaux numériques 25
II.7 Défis 26
II.8 Jumeau numérique : mise en œuvre de plusieurs technologies 27
II.9 Domaines d'application des jumeaux numériques 28
II.9.1 Industrie : 28
II.9.2 Santé et bien-être 28
II.9.3 Automobile 28
II.9.4 Transport et logistique 29
II.9.5 Commerce 29
II.9.6 Secteur public 30
II.9.7 Agriculture 30
II.10 Différentes couches du jumeau numérique 31
II.10.1 Couche physique 32
II.11 Plateformes de jumeaux numériques 32
II.11.1 AWS IoT 33
II.11.2 Azure Digital Twins 33
II.11.3 Ditto 33
II.11.4 Siemens MindSphere 33
II.11.5 PTC ThingWorx: 33
II.11.6 Altair smartworks 34
II.12 Conclusion 34

chapitre 3 Conception et Implémentation

III.1 Introduction 35
III.2 Cahier de charge 35
III.3 Système proposé 36
III.4 Implémentation 36
III.4.1 Couche physique et communication 37
III.4.2 Couche de jumeau numérique 39
III.4.3 Application web 44
III.5 Résultats de test 51
III.6 Conclusion 60

1 Conclusion générale 67
Référence bibliographique_ 63

Anexxe

1 Annexe 1 67
2 Annexe 2 75
2.1 Annexe 3 82
2.2 Annexe 4 87
2.3 Annexe 5 89

Liste abréviation

2D : Deux dimensions

3D : Trois dimensions

AWS : Amazon Web Services

BACnet : Building Automation and Control Network

CAO : Conception Assistée par Ordinateur

CO_2 : Dioxyde de carbone

CPS : Cyber-Physical System

CRM : Customer Relationship Management

CSS: Cascading Style Sheets

DSS : Décision Support System

DT : Digital Twin

ERP : Enterprise Resource Planning

GPAO : Gestion de Production Assistée par Ordinateur

HTML: HyperText Markup Language

IA : Intelligence Artificielle

IDE : Environnement de développement intégré

IHM : Interface Homme-Machine

IoS : Internet of Services

IoT : Internet of Things

JS : Java Script

JSON : JavaScript Object Notation

KNX : Konnex

LED : Light-Emitting Diode

M2M : Machine-to-Machine

NASA : National Aeronautics and Space Administration

OSI : Open Systems Interconnection

PCB: Printed Circuit Board

pH : Potentiel hydrogène

PLM : Product Lifecycle Management

PTC : Product Lifecycle Management

RCSF : Réseau de capteur sans fil

SLR : Système de Localisation et de Régulation

SQL: Structured Query Language

TIC : Technologies de l'Information et de la Communication

VS : Visual Studio

Wi-Fi : Wireless Fidelity

Table de figure

Chapitre 1 : Généralités sur les serres agricoles et l'agriculture intelligente

Figure I. 1 serre agricole 4
Figure I. 2 Eléments principaux dans une serre intelligence 5
Figure I. 3 Ventilation dans la serre 6
Figure I. 4 Chauffage dans une serre 7
Figure I. 5 Système de refroidissement “Cooling Pad” 8
Figure I.6 Éclairage à LED pour les serres 9
Figure I. 7 Arrosage par aspersion 10
Figure I. 8 Développement de l’agriculture 11
Figure I. 9 Flux de données entre les technologies de base de l'agriculture 4. 14
Figure I. 10 Utilisation de capteur sur l'agriculture 15
Figure I. 11 Réseaux de capteurs sans fil 16
Figure I. 12 IoT dans l'agriculture 17

Chapitre 2 : Jumeau numérique

Figure II. 1 Présentation générale du jumeau numérique 21
Figure II. 2 Classification du jumeau selon les maturités 22
Figure II. 3 Processus de fabrication modèle de jumeau numérique 25
Figure II. 4 Architecture générale d'un jumeau numérique 27
Figure II. 5 Jumeau numérique d’usine 28
Figure II. 6 jumeaux numériques d’une automobile 29
Figure II. 7 Utilisation des jumeaux numérique pour commerce 30
Figure II. 8 City intelligent 30
Figure II. 9 Jumeau numérique d'une serre intelligent 31
Figure II. 10 Couches d’un jumeau numérique 32

Figure III. 1 Architecture générale de système proposé 36
Figure III. 2 Partie du programme Arduino 37
Figure III. 3 Configuration de Wi-Fi sur Arduino 37
Figure III. 4 Connecter d’esp8266 au firebase 37
Figure III. 5 Organigramme de programme Arduino 38
Figure III. 6 Câblage des capteurs et actionneurs avec le NodeMCU ESP8266 39
Figure III. 7 Utilisateurs autorise 40
Figure III. 8 Modèle dynamique de serre 42
Figure III. 9 Bibliothèques utilisé pour le modèle 42
Figure III. 10 Configuration de firebase pour ajoute le modèle 43
Figure III. 11 Modèle 3D d'une serre 44
Figure III. 12 Bibliothèques utilisent sur le programme React 45
Figure III. 13 creation de projet React ur vercel 46
Figure III. 14 Interface d’authentification Login 47
Figure III. 15 Page principale d’application web 47
Figure III. 16 Interface Simulation 48
Figure III. 17 Interface de visualisation 49

Figure III. 18 Historique des valeurs de lumière sur l'application 50
Figure III. 19 Historique des valeurs de $CO2$ sur l'application 50
Figure III. 20 Circuit de projet 51
Figure III. 21 Equivalent de LED en réel 52
Figure III. 22 Valeurs des capteurs sur l'interface 53
Figure III. 23 Valeur des capteurs sur firebase 53
Figure III. 24 Valeur des capteurs sur série moniteur 54
Figure III. 25 Etat des actionneurs sur la page de commande 55
Figure III. 26 Etat des actionneurs sur le serial moniteur 55
Figure III. 27 Etat des actionneurs sur firebase 56
Figure III. 28 Etat des actionneurs sur l'interface 56
Figure III. 29 Etat des actionneurs sur la page de commande 2 57
Figure III. 30 Etat des actionneurs sur firebase 58
Figure III. 31 Etat des actionneurs sur le serial moniteur 2 58
Figure III. 32 Etat des actionneurs sur l'interface 2 59
Figure III. 33 comparaison entre la température réelle et de la température prédite 59
Figure III. 34 comparaison entre l'humidité réelle et de l'humidité prédite 60

Table de tableau

Tableau 1 Paramètres de modèle de serre identifiés 43

Introduction générale

Introduction générale

L'agriculture sous serre offre un environnement contrôlé pour la culture des plantes, mais sa gestion manuelle peut être complexe et exigeante. Les exploitants de serres agricoles doivent constamment équilibrer les paramètres environnementaux pour favoriser une croissance optimale des plantes. Des erreurs humaines, des fluctuations indésirables et la gestion inefficace des ressources peuvent entraîner des pertes de récoltes et une diminution de la rentabilité.

Les jumeaux numériques, également connus sous le nom de "Digital Twins" en anglais, sont des représentations virtuelles précises d'objets, de systèmes ou de processus du monde réel. Ils sont créés en collectant des données en temps réel à partir de capteurs et en les combinant avec des modèles informatiques avancés. Les jumeaux numériques permettent de surveiller, de simuler et d'optimiser les performances et les caractéristiques des objets réels, offrant ainsi de nombreux avantages dans divers domaines, notamment l'industrie, la santé, les transports et l'agriculture. Grâce à leur capacité à reproduire fidèlement les conditions et les comportements réels, les jumeaux numériques offrent une vision complète et précise qui facilite la prise de décisions éclairées, l'optimisation des ressources et la réduction des coûts. Ils constituent une avancée technologique prometteuse et sont devenus un outil précieux dans le monde moderne, permettant d'améliorer l'efficacité, la durabilité et la productivité de manière intelligente.

Les jumeaux numériques jouent un rôle crucial dans l'agriculture moderne. Ils offrent une représentation virtuelle en temps réel des conditions environnementales et des processus de croissance des plantes, permettant aux agriculteurs de prendre des décisions éclairées et de mettre en œuvre des pratiques agricoles optimisées. Les jumeaux numériques facilitent la simulation de scénarios, la surveillance continue des paramètres environnementaux et l'optimisation de l'utilisation des ressources telles que l'eau et l'énergie. Ils contribuent ainsi à maximiser le rendement, la qualité des récoltes, et à minimiser les pertes tout en réduisant les coûts et l'impact environnemental.

Dans ce projet de fin d’étude, nous proposons de développer un système de gestion intelligent des serres agricoles reposant sur un jumeau numérique. Ce système basé sur l'utilisation de capteurs connectés à une carte électronique NodeMCU ESP8266 pour collecter les paramètres agricoles, le stockage des données dans le cloud Firebase, et la création d'une application web avec React pour visualiser et exploiter ces données. Les données sont analysées

par un algorithme (ToR) pour prendre des décisions automatisées et ajuster les conditions de la serre, telles que le contrôle du climat, l'irrigation et de l'éclairage. Cette approche, offre un moyen efficace de gérer les serres agricoles en optimisant les ressources et en améliorant la productivité de manière intelligente

Le mémoire est structuré en trois chapitres. Le chapitre 1 présente quelques généralités sur les serres agricoles et les serres intelligentes, ainsi que les paramètres climatiques qui contrôlent la croissance des plantes. Le chapitre 2 explique la définition du jumeau numérique, ses composants et ses couches. Enfin, le chapitre 3 présente l'environnement de travail, les résultats d'implémentation de notre projet. Le mémoire se conclut par une conclusion générale et des perspectives.

Chapitre 1
Généralités sur les serres agricoles et l'agriculture intelligente

I.1 Introduction

L'agriculture a connu de nombreuses évolutions au fil des siècles, passant de méthodes traditionnelles à une agriculture plus industrielle et mécanisée. Cependant, la nouvelle ère de l'agriculture 4.0 est en train de transformer l'agriculture de manière significative. Les avancées technologiques telles que l'Internet des objets (IoT), l'intelligence artificielle (IA), la robotique, la blockchain et les drones, sont en train de révolutionner l'industrie agricole et de créer de nouvelles opportunités pour les agriculteurs.

L'agriculture 4.0, également appelée "agriculture intelligente", est un système d'agriculture numérisé qui utilise des technologies de pointe pour améliorer la productivité, la durabilité et la rentabilité de l'agriculture. L'objectif principal de l'agriculture 4.0 est d'optimiser les processus de production et de gestion agricole, en utilisant les données et les analyses pour prendre des décisions plus éclairées.

L'agriculture 4.0 est une réponse aux défis actuels et futurs de l'agriculture, tels que la sécurité alimentaire, la croissance de la population, la rareté des ressources et les changements climatiques. En intégrant les technologies numériques dans l'agriculture, il est possible de maximiser les rendements, d'améliorer la qualité des cultures et de réduire l'utilisation des pesticides et des engrais, tout en réduisant les coûts et en augmentant les profits.

Dans ce chapitre, nous allons explorer plus en détail les technologies qui sous-tendent l'agriculture 4.0, les avantages qu'elle offre aux agriculteurs et à l'industrie agricole dans son ensemble, et les défis qui doivent être relevés pour permettre une adoption généralisée de cette nouvelle ère de l'agriculture.

I.2 Serres agricoles

Une serre agricole (figure I.1) est une structure conçue pour la production agricole intensive sous serre, souvent utilisée dans la culture de plantes à grande échelle. Elle est généralement plus grande que les serres de jardinage et peut être équipée de technologies avancées pour contrôler l'environnement de croissance, tels que des systèmes de chauffage, de ventilation, d'éclairage et d'irrigation. Les serres agricoles peuvent être utilisées pour produire une grande variété de cultures, y compris des légumes, des fruits, des fleurs, des plantes ornementales, des plantes médicinales, des plantes aromatiques et des plantes en pot. Elles permettent également de protéger les cultures des intempéries, des ravageurs et des maladies, et peuvent prolonger la saison de croissance. Les serres agricoles sont couramment utilisées dans l'agriculture commerciale et peuvent être construites dans une variété de formes et de tailles en fonction des besoins spécifiques de l'exploitation agricole.

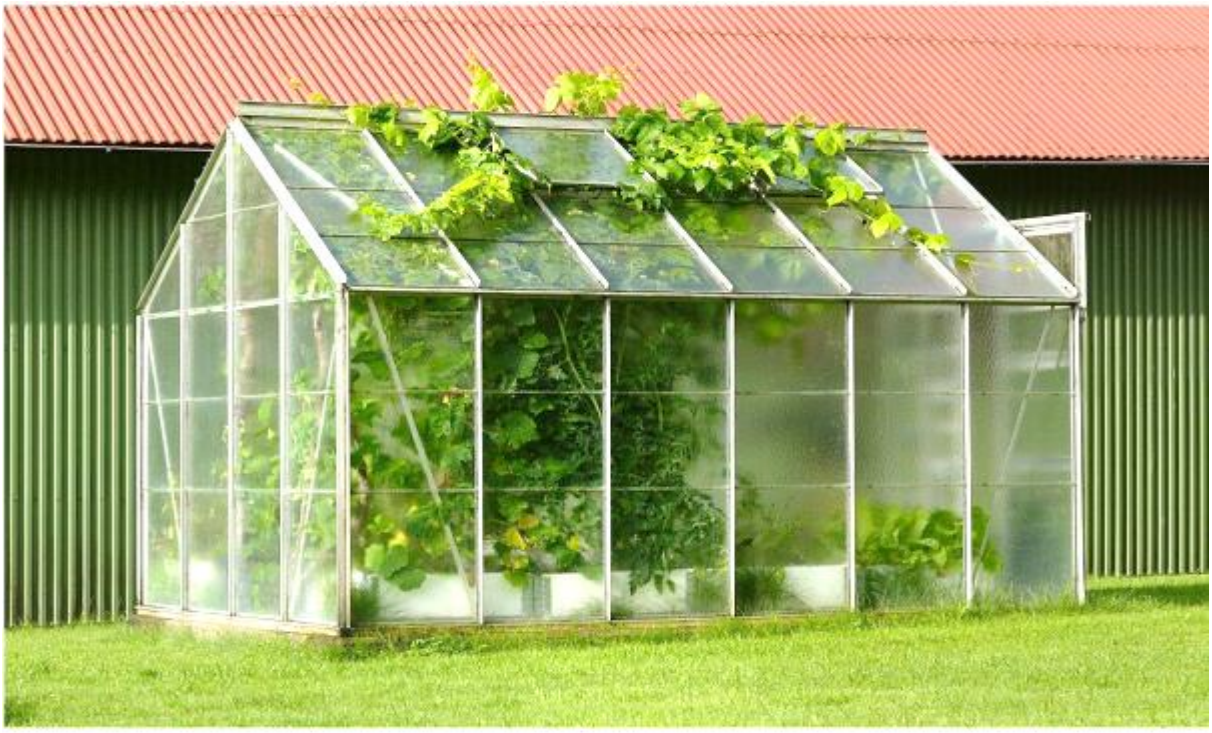


Figure I. 1 serre agricole

I.2.1 **Conditions environnementales dans les serres**

La progression des plantes dans les serres implique certaines conditions climatiques spéciales.

Dans ce qui suit, on présente d'une manière générale ces conditions.

I.2.1.1 **Lumière**

La plupart des légumes ont besoin d'au moins 8 heures de lumière par jour pour produire de manière satisfaisante. Dans les zones nuageuses ou les courtes journées d'hiver, un éclairage supplémentaire peut être nécessaire.

I.2.1.2 **Gaz carbonique**

Les serres commerciales utilisent couramment des générateurs de CO2 pour maximiser leur production. Lors de la conception d'un système de CO2, les rendements n'augmenteront que si le CO2 est le « facteur limitant ». Cela signifie que si toutes les autres variables ne sont pas optimales (lumière, engrais, température / humidité, pH, etc.), les avantages d'une augmentation des niveaux de CO2 ne seront pas obtenus **[1]**.

I.2.1.3 **Mouvement de l'air**

Il est aussi un facteur important qui affecte la croissance de la plante, modifiant les transferts d'énergie, la transpiration et l'absorption de CO2, ce qui affecte la taille des feuilles, ainsi que la croissance de la tige et le rendement. Le taux de photosynthèse peut être augmenté de 40 pourcents si la vitesse du vent augmente de 10 à 100 centimètres par seconde **[1]**.

I.2.1.4 Humidité

L'humidité de l'air et du sol sont deux facteurs importants pour la croissance des plantes

I.2.1.5 Température

La température de l'environnement intérieur et extérieur, du sol et de l'eau doit également respecter certaines normes.

I.2.2 Systèmes de contrôle

Il existe de nombreuses techniques utilisées pour contrôler l'environnement des serres. Dans ce qui suit, on présente certaines des techniques plus utilisées pour contrôler les facteurs environnementaux.

La figure I.2 illustre les éléments principaux qui composent un système de serre intelligente.

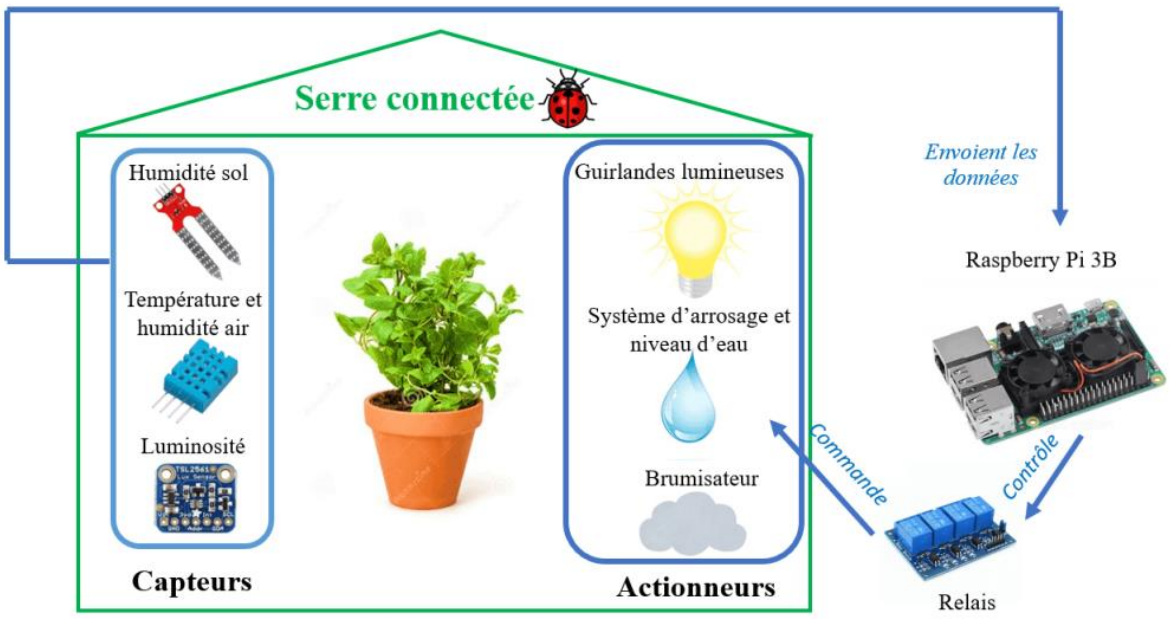


Figure I. 2 Eléments principaux dans une serre intelligence

I.2.2.1 Système de ventilation

Le traitement de l'air a une fonction importante lorsque la culture est dans un espace fermé. Un ventilateur (figure I.3) permet de renouveler l'air et d'apporter du CO_2 nécessaire à la photosynthèse tout en garantissant une régulation de la température et de l'hygrométrie. Le mouvement horizontal de l'air offre plusieurs avantages. Plus particulièrement, il réduit sensiblement les gradients de la température dans la serre et diminue le taux d'humidité. Il favorise ainsi une grande homogénéité du climat sous serre.,**[2]**

Une mauvaise aération peut engendrer des difficultés de nouaison, le développement des maladies et une qualité du fruit médiocre (mauvaise coloration, faible tenue, fruit creux...).

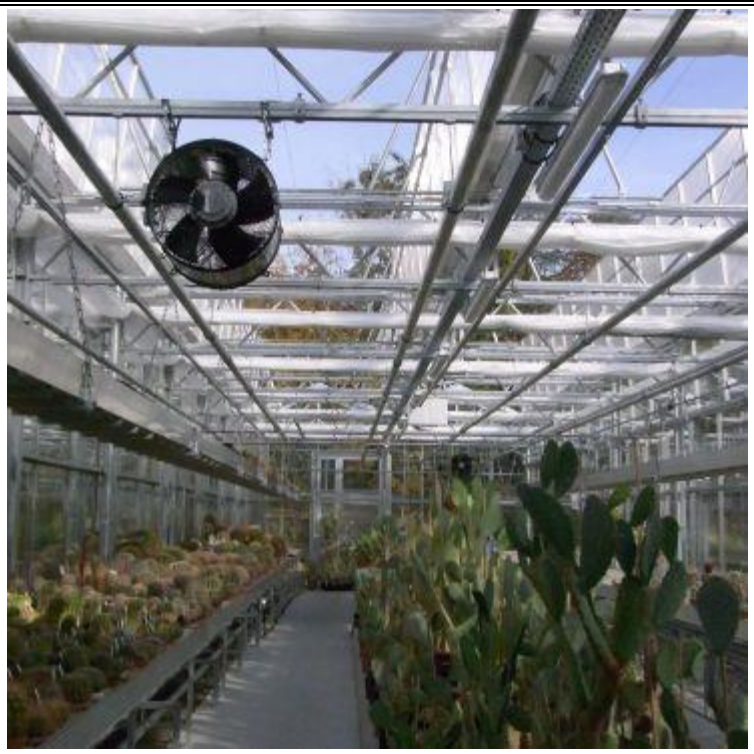


Figure I. 3 Ventilation dans la serre

En période hivernale, allant de Décembre à Février, les abris doivent être manipulés de la façon suivante :

- Fermer totalement les tunnels pendant la nuit et assurer une bonne étanchéité des abris-serre.
- Ouvrir tôt le matin afin d'éliminer l'excès d'humidité.
- Fermer un peu plus tôt l'après-midi pour emmagasiner la chaleur et ce afin de garder une température proche de l'optimum pendant la nuit.

De Septembre à Novembre et de Mars à Mai on laisse ouverts, pendant la nuit, les côtés opposés aux vents dominants et on ouvre au maximum l'abri durant la journée afin d'éliminer l'excès de chaleur et d'humidité. Toutefois, on peut utiliser du filet insect-proof afin d'éviter l'envahissement des serres par les insectes ravageurs et vecteurs de maladies virales.

I.2.2.2 **Système de Chauffage des Serres**

Pour maintenir la température nécessaire à la survie des plantes, il faut installer un système de chauffage dans la serre. Il aura un rôle soit d'antigel en maintenant la température vers 2°C au minimum soit de chauffage au sens strict du terme pour obtenir une ambiance tempérée ou tropicale dans la serre.

Le système de chauffage doit être suffisamment puissant pour atteindre et maintenir efficacement la température choisie. Quant à l'énergie utilisée, tout dépend de région climatique,

des frais d'installation et des coûts d'utilisation compte tenu du système de chauffage qui équipe la serre. La figure I. 4 illustre un chauffage installé à l'intérieur d'une serre agricole.



Figure I. 4 Chauffage dans une serre

I.2.2.3 **Système de refroidissement**

Le Systèmes de refroidissement utilisés pour ombrager la serre et limiter l'augmentation de la température à l'intérieur de celle-ci. Il y a plusieurs méthodes de refroidissement d'une serre :

- Rideaux d'ombrage.
- Panneaux humides de refroidissement.
- Brouillard Basse Pression.
- Cooling Pad (Figure I.5)

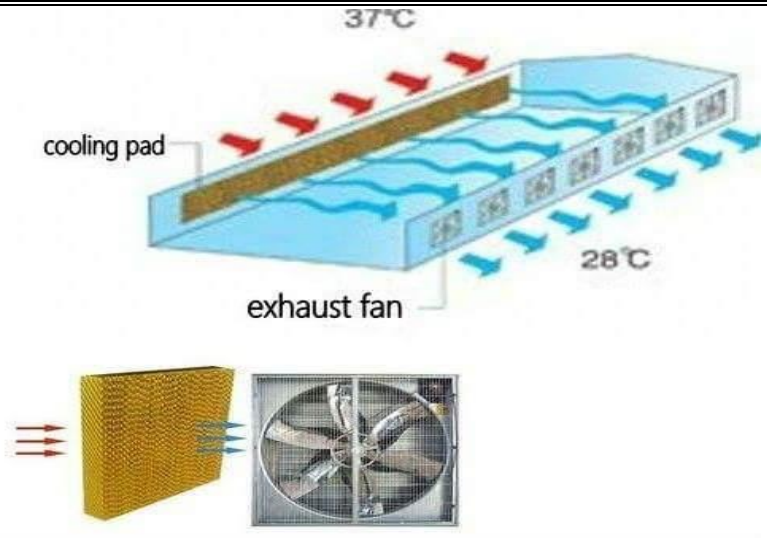


Figure I. 5 Système de refroidissement "Cooling Pad"

I.2.2.4 **Système d'éclairage artificielle**

La lumière est aussi un facteur essentiel pour la croissance des plantes. Les serres sont conçues pour créer un environnement optimal pour les plantes en croissance. Parce que la lumière du soleil est la source de lumière la moins chère, la translucidité des serres et l'ombrage à effet de serre sont des facteurs importants.

Malheureusement, la lumière naturelle n'est pas toujours disponible en quantité suffisante pour la culture commerciale. L'éclairage artificiel permet aux producteurs d'augmenter leur productivité et de prolonger la saison de croissance. Pour que les plantes poussent, elles utilisent une portion relativement faible de l'apport total (spectre).**[3]**

Il y a plusieurs méthodes pour éclairer une serre :

- Éclairage par LED (Figure I.6).
- Éclairage par lampe de sodium haute pression.
- Les tubes fluorescents.



Figure I.6 Éclairage à LED pour les serres

I.2.2.5 **Système d'irrigation**

Il peut être bon de penser à un système d'irrigation. En effet, un système d'arrosage automatique comporte de nombreux avantages :

Adaptation de l'irrigation aux plantes, cela est permis grâce au système d'irrigation goutte à goutte à distance.

- Réglage temporaire : Permet d'arroser à certaines heures (par temps froid ou la nuit).
- Économisez de l'eau et arrosez plus précisément.
- L'irrigation peut être sélective, une ligne à la fois, par exemple.
- Permet d'économiser beaucoup de temps et un contrôle strict de l'approvisionnement en eau.

Dans le cas de l'irrigation automatique, il faudra privilégier un système permettant différentes quantités d'eau en fonction des plantes.

Il existe plusieurs méthodes principales utilisées en irrigation automatique :

- Le goutte-à-goutte : Le goutte-à-goutte est conçu pour fournir une quantité d'eau mesurée à chaque plante et sert aussi bien à arroser les parterres que les pots.
- Irrigation par aspersion (Figure I.7): C'est un système idéal pour arroser les jeunes plants, à utiliser de préférence en été, car l'hiver il laisse le feuillage humide et favorise ainsi les maladies.



Figure I. 7 Arrosage par aspersion

I.2.2.6 **Système d'aération**

Le système d'ouverture des serres permet d'aérer la serre afin d'ajuster la température, de l'humidité, de CO_2, etc... Un système de contrôle de température peut être réalisé en utilisant un capteur de température, qui se fait lire par un circuit électronique, qui lui décide à partir de quelle et jusqu'à quelle température il faut maintenir ouvert (Grâce à un petit moteur et un mécanisme de transformation du mouvement). [4]

I.2.2.7 **Surveillance de l'environnement**

La surveillance de l'environnement et de climat intérieur et extérieur des serres est une opération importante dans le cas des serres intelligentes automatisées. Elle est basée sur l'utilisation des divers capteurs à déployés à l'intérieur et à l'extérieur de la serre. Ces capteurs doivent être reliés à un système (filaire ou sans fil) de capture qui collecte en temps réel et d'une manière permanent les données fournies par ces capteurs.

I.3 **Développement de secteur agricole**

Les êtres humains cultivent des terres et élèvent des animaux pour obtenir la nourriture nécessaire à leur survie. Cette pratique, appelée agriculture, a évolué selon un processus à long terme et progressif, passant de l'agriculture 1.0 à 4.0, comme le montre la figure I.8.

Dans la figure I.8, l'agriculture 1.0 se réfère à l'ère agricole traditionnelle, répondant principalement aux forces de la main-d'œuvre et des animaux. Dans cette étape, bien que des outils simples comme des faucilles et des pelles aient été utilisées dans les activités agricoles, l'homme ne peut toujours pas se débarrasser du lourd travail manuel, de sorte que la productivité reste à un faible niveau. Jusqu'au XIX ème siècle, les machines à vapeur ont été améliorées et largement utilisées pour fournir de nouvelles puissances dans tous les domaines de la vie, y compris l'agriculture. Elle est arrivée à l'ère de l'agriculture 2.0, lorsque diverses machines agricoles étaient utilisées manuellement et que de nombreux produits chimiques

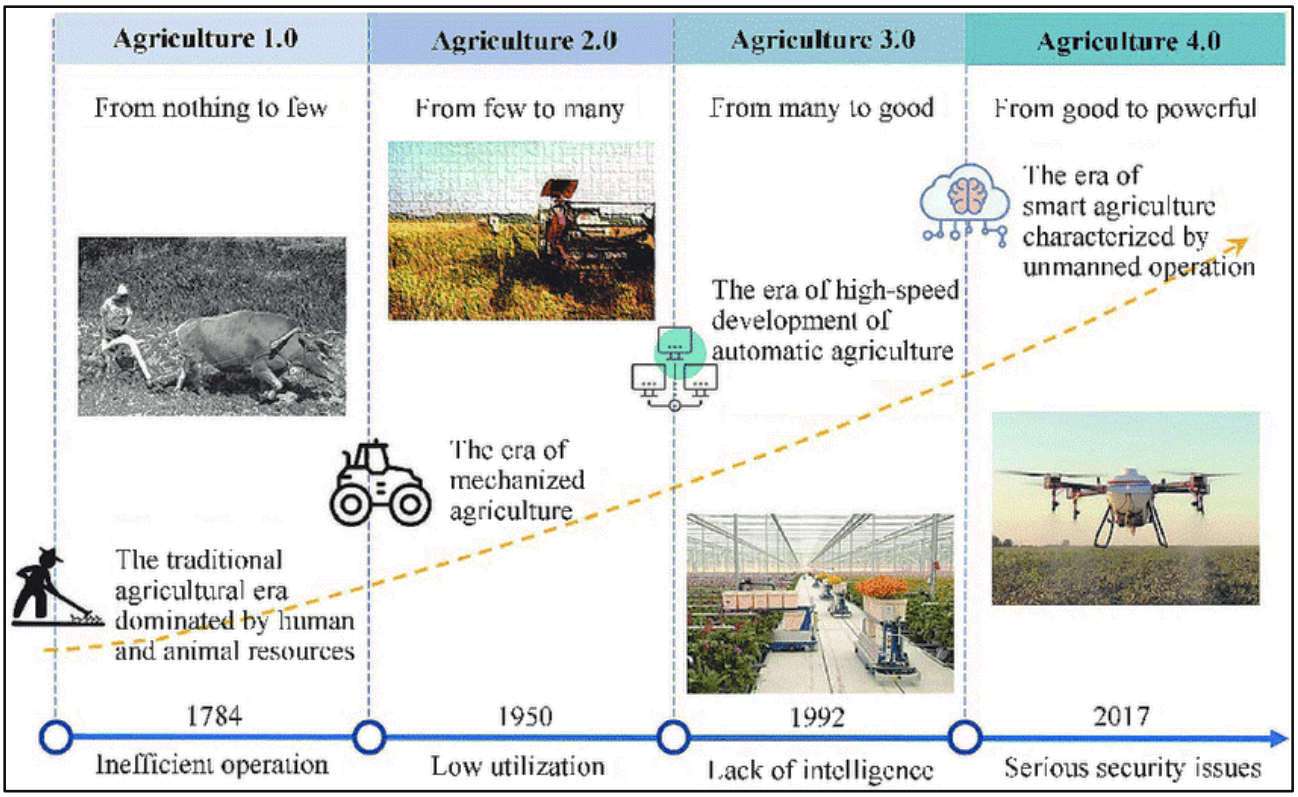


Figure I. 8 Développement de l'agriculture

étaient utilisés. Il n'est évident que l'agriculture 2.0 a considérablement augmenté l'efficacité et la productivité des travaux agricoles. Néanmoins, cette amélioration substantielle a eu des conséquences trop néfastes : contaminations chimiques sur le terrain, destruction de l'environnement écologique, consommation excessive d'énergie et gaspillage des ressources naturelles. Au XX ème siècle, l'agriculture 3.0 est née du développement rapide de l'informatique et de l'électronique. Les programmes informatiques et les techniques des robots ont permis aux machines agricoles d'effectuer des opérations de manière efficace et intelligente. Avant que les problèmes laissés dans l'agriculture 2.0 n'aillent trop loin, les stratégies ont été ajustées dans l'agriculture 3.0. La distribution raisonnable du travail aux machines agricoles a permis de réduire l'utilisation de produits chimiques, d'améliorer la précision de l'irrigation, etc. Aujourd'hui, l'évolution de l'agriculture s'inscrit dans l'agriculture 4.0, grâce à l'utilisation de technologies actuelles comme l'Internet des Objets (IoT), big data, l'intelligence artificielle, les réseaux de capteurs sans fils (RCSF), etc. **[5]**.

I.4 Agriculture intelligente

I.4.1 Définition de l'agriculture intelligente

L'agriculture intelligente est une révolution de l'agriculture classique qui implique la réorientation des systèmes agricoles afin de soutenir efficacement le développement

alimentaire. Le principal objectif de l'agriculture intelligente est d'accroître la productivité et les revenus agricoles

L'agriculture intelligente implique l'utilisation des technologies de la communication de l'information (TIC) et en particulier de l'Internet des objets (IoT) et de l'analyse de données volumineuses (Big data) associées pour faire face à ces défis via la surveillance électronique des cultures, ainsi que pour l'environnement, le sol, la fertilisation et conditions d'irrigation. Ces données de surveillance peuvent ensuite être analysées pour identifier les cultures qui répondent le mieux aux objectifs de productivité de toute exploitation agricole dans le monde **[6].**

I.4.2 Catégorie de l'agriculture intelligente

I.4.2.1 Agriculture de précision

L'agriculture de précision est un principe de gestion des parcelles agricoles qui vise l'optimisation des rendements et des investissements, en cherchant à mieux tenir compte des variabilités des milieux et des conditions entre parcelles différentes ainsi qu'à des échelles intra-parcellaires **[7].**

Elle s'intéresse à l'intégration et l'utilisation des technologies de l'information et de divers éléments tels que capteurs, systèmes de contrôle, robots et véhicules autonomes pour faciliter la gestion de l'élevage et de la croissance des cultures.

L'agriculture de précision est l'une des applications Internet les plus populaires dans le secteur agricole. De nombreuses organisations bénéficient de cette technologie dans le monde entier. Elle peut impliquer l'utilisation de divers types de capteurs qui remontent des informations riches de manière régulière, notamment des :

- Capteurs de sol qui recueillent des données sur la teneur des sols en azote
- Capteurs d'irrigation mesurent le niveau d'eau
- Capteurs d'inondation surveillent également les niveaux d'eau
- Capteurs de gel

Les informations fournies par ces capteurs permettront de contrôler automatiquement le système d'irrigation et d'arrosage et d'alerter automatiquement les utilisateurs lorsque les conditions météorologiques ou autres événements susceptible d'endommager les plants sensibles se produisent.

I.4.2.2 Contrôle du bétail

L'internet des objets peut aider également à contrôler les bétails. Les grandes exploitations peuvent tirer parti des applications Internet sans fil pour collecter des données sur l'emplacement, le bien-être et la santé de leurs animaux, ce qui les aide à identifier les animaux

malades et à les séparer du troupeau, évitant ainsi la propagation de la maladie. Avec l'aide de capteurs basés sur Internet [8].

I.4.2.3 **Serres intelligentes**

La serre intelligente est une serre qui intègre la technologie de l'Internet des objets en vue d'améliorer la productivité des légumes, des fruits et des cultures. La technologie de l'Internet des objets est ainsi utilisée pour collecter et analyser en temps réel les indicateurs bioclimatiques de la serre et par conséquent appliquer (d'une manière automatique, semi-automatique ou manuelle) les mesures et actions requises pour maintenir les conditions environnementales nécessaires aux plantes.

Pour contrôler la serre, différents capteurs (connectés à internet ou non) sont utilisées pour mesurer les normes environnementales en fonction des exigences de chaque plante. Ceci élimine la nécessité d'une surveillance statique dans les serres. Ces capteurs fournissent des informations sur les niveaux de lumière, de pression, d'humidité et de température, qui contrôlent automatiquement les déclencheurs pour ouvrir la fenêtre, allumer les lumières, contrôler le chauffage et allumer le ventilateur.

I.4.3 **Technologies de base de l'agriculture 4.0**

Bien que l'utilisation de données dans le secteur agricole ne soit pas un concept nouveau, la nouveauté réside dans la possibilité de la numérisation du secteur. Un autre aspect concerne la qualité de l'information obtenue au niveau de l'exploitation agricole et les technologies utilisées pour collecter, stocker, traiter, gérer et partager de telles données. Les avancées dans la technologie des capteurs ont permis aux agriculteurs de surveiller des paramètres spécifiques en temps réel, tandis que les robots ont soutenu une meilleure automatisation des processus. De plus, la puissance de calcul est devenue plus accessible et abordable, ce qui a également aidé à la création de nouveaux outils d'aide à la décision pour une meilleure gestion agricole. Par exemple, le big data prend en charge un volume élevé de données en temps réel et historiques, et les méthodes basées sur l'IA transforment ces données en valeur ajoutée et en connaissances exploitables. Une illustration du flux de données entre les technologies identifiées est présentée dans la figure I.9.

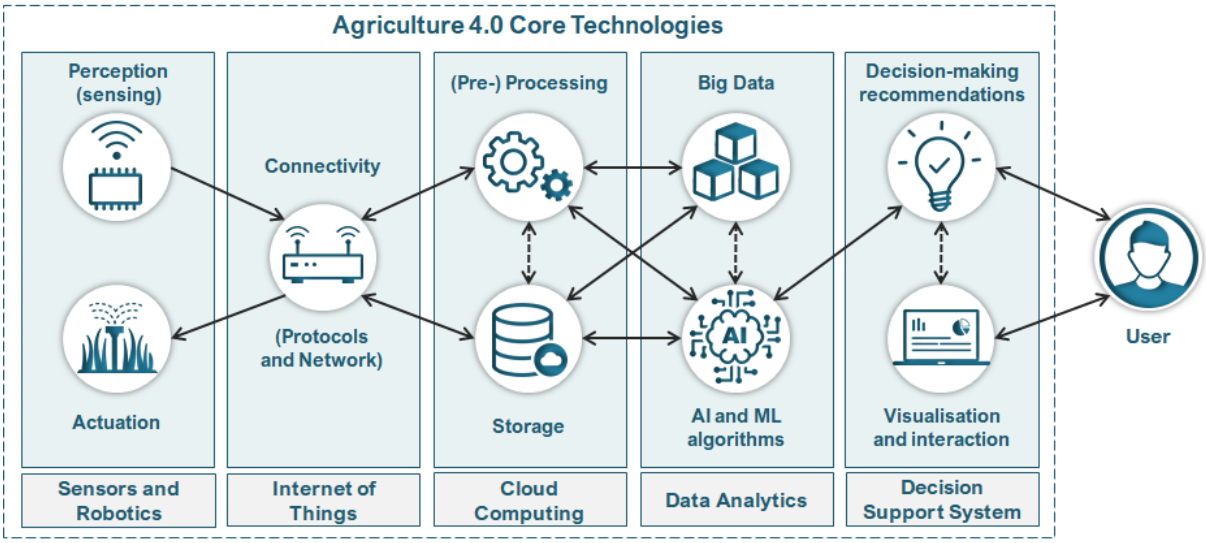


Figure I. 9 Flux de données entre les technologies de base de l'agriculture 4.

Les données souhaitées sont collectées par des dispositifs IoT (capteurs, robots, etc.) sur le terrain et transférées via un réseau filaire/sans fil vers le serveur cloud pour un stockage, un traitement et une analyse ultérieurs. Grâce à la technologie du Big Data et aux méthodes basées sur l'IA, il est possible de transformer les données collectées en connaissances à valeur ajoutée.

Enfin, un Système d'Aide à la Décision (DSS) fournit les ressources nécessaires aux décideurs (les utilisateurs) pour tirer parti du système IoT et interagir avec lui, en ce qui concerne les actions d'optimisation à entreprendre.

Cependant, l'ordre des étapes peut être quelque peu différent en fonction de la configuration IoT utilisée et des techniques informatiques utilisées. Par exemple, certains systèmes prétraitent les données dans le cadre de l'informatique en périphérie et du fog computing avant de les transférer vers le cloud, tandis que d'autres systèmes traitent les données sur le cloud lui-même [9].

Ainsi, la section actuelle présente un aperçu des rôles des technologies précédemment identifiées comme étant fréquemment mentionnées et utilisées dans le contexte de l'Agriculture 4.0.

I.4.3.1 **Capteurs et drones**

Les capteurs agricoles (figure I.10), tels que les capteurs de sol, d'humidité, de température et de luminosité, jouent un rôle essentiel en fournissant des données précieuses sur l'état des cultures et des sols. De plus, les drones équipés de caméras et de capteurs peuvent être utilisés pour surveiller les cultures à grande échelle, détecter les maladies et les ravageurs, et

même réaliser des pulvérisations précises, offrant ainsi de nouvelles perspectives pour l'agriculture de précision [10].



Figure I. 10 Utilisation de capteur sur l'agriculture

I.4.3.2 **Robotique**

Les robots agricoles automatisent certaines tâches agricoles, telles que la plantation, la récolte, le désherbage et l'épandage d'engrais. Ces robots sont équipés de capteurs et de systèmes de vision qui leur permettent de fonctionner de manière autonome dans les champs, réduisant ainsi la dépendance à la main-d'œuvre et améliorant l'efficacité [11].

I.4.3.3 **Réseaux de capteurs sans fil**

Ce réseau créera de nouvelles opportunités pour les domaines prometteurs du développement des systèmes de télécommunications. Composé de microcontrôleurs, de batteries, de mémoire et de capteurs, cet appareil est unique :

- Coût réduit
- Consommation d'énergie réduite
- Disponibilité d'une interface radio
- Grâce à sa petite taille, il s'est infiltré dans de nombreux domaines.

Trois technologies pour les réseaux de capteurs sans fil, KNX, BACnet et ZigBee, ont été officiellement reconnues [12].

Actuellement, les technologies Wi-Fi et Bluetooth sont également utilisées pour les réseaux de capteurs sans fil. Dans cette vision moderne, les protocoles sont caractérisés par un modèle à 7 niveaux pour l'interaction des systèmes OSI ouverts (Figure I.11).

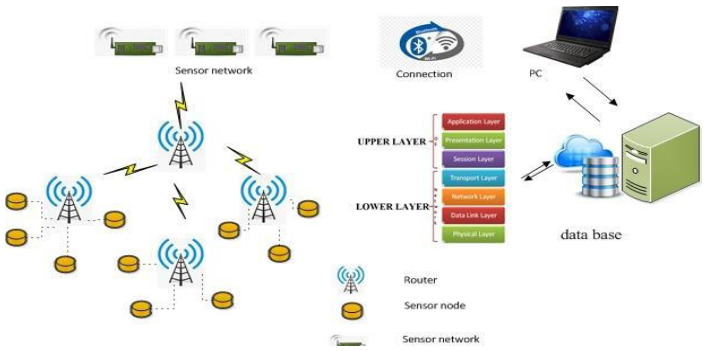


Figure I. 11 Réseaux de capteurs sans fil

I.4.3.4 **Internet des objets**

L'internet des objets est un concept large et coloré qui évoque les images d'un monde connecté et communicable. Leurs utilisateurs communiquent sur Internet ainsi que sur d'autres réseaux moins connus mais tout aussi efficaces.

L'internet des objets est en pleine révolution numérique qui va bouleverser notre mode de vie comme les logements (smart home) et les réfrigérateurs intelligents [13]

I.4.3.4.1 Architecture de l'Internet des objets

Les appareils du réseau doivent être connectés les uns aux autres, ce qui est une condition préalable essentielle d'un IoT. Le fonctionnement de l'IoT, qui relie les mondes réel et virtuel, doit être garanti par l'architecture du système IoT.

De nombreuses variables, telles que la mise en réseau, la communication et les opérations, entrent dans la conception de l'architecture IoT. L'extensibilité, l'évolutivité et l'opérabilité sur tous les appareils doivent toutes être prises en compte lors de la création d'une architecture IoT.

Étant donné que les éléments peuvent se déplacer et doivent interagir avec d'autres en temps réel, la conception de l'IoT doit être adaptable pour permettre aux appareils d'interagir les uns avec les autres de manière dynamique et de prendre en charge la communication [14].

I.4.3.4.2 Applications IoT agricoles

L'agriculture de précision, dont la conception intègre les techniques IoT pour l'agriculture urbaine et l'agronomie de précision dans les villes intelligentes, est l'une des utilisations les plus courantes des technologies IoT dans l'agriculture (figure I.12) comme les drones agricoles. Les drones équipés de capteurs puissants et relativement peu coûteux offrent

aux agriculteurs de nouvelles opportunités pour augmenter les rendements et réduire les dommages aux cultures, entre autres.

L'agriculture verticale est une autre application des technologies IoT, qui permet aux utilisateurs de contrôler l'humidité du sol et la teneur en eau à l'aide d'ordinateurs ou d'appareils mobiles tels que des tablettes et des smartphones. [14]

Enfin, il existe des applications qui mélangent IoT et IA, comme Malthouse, un système d'IA qui permet de prescrire des paramètres et des horaires dans l'agriculture de précision et la fabrication alimentaire. [14]

Les serres intelligentes sont de plus en plus répandues dans les zones métropolitaines car elles permettent le suivi de nombreux paramètres des solutions nutritives ainsi que l'amélioration de la croissance, du rendement et de la qualité des plantes.

Ces avancées aident les villes intelligentes à mettre en place des infrastructures qui permettent l'automatisation, l'optimisation et le développement de l'agriculture urbaine et de l'agronomie de précision. [14]

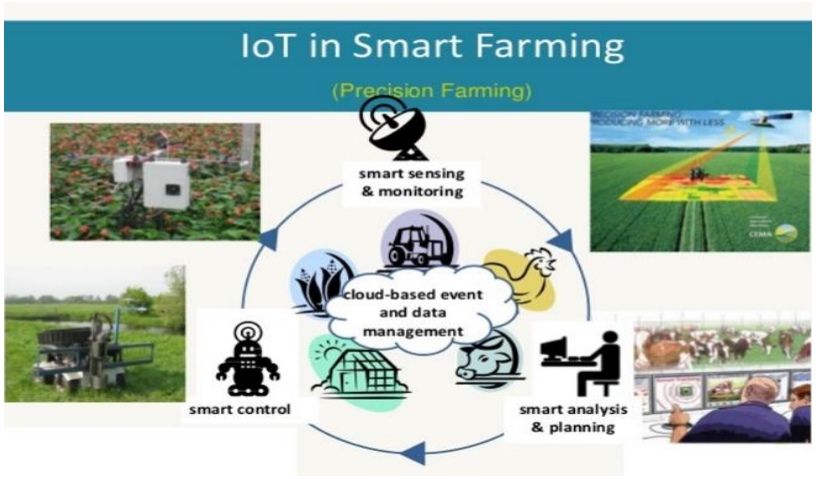


Figure I. 12 IoT dans l'agriculture

I.4.4 **Avantages de l'automatisation des serres**

L'automatisation des serres permet d'assurer au moins les avantages suivants :

- Protégez les plantes contre les températures extrêmes. Le maintien d'une température intérieure contrôlée dans un environnement de serre est crucial pour éviter d'endommager ou tuer les plantes.
- Protégez les plantes contre les maladies. Garder les plantes en bonne santé et prospère requiert le meilleur environnement de croissance possible. Le système de contrôle automatique permet surveiller en temps réel tous les changements

environnementaux et des statuts ou défaillances d'équipement. Il permet également de surveiller des conditions telles que les fluctuations de l'humidité, les failles de sécurité, le chauffage, le ventilateur, l'équipement et les pannes de courant.

- surveiller à distance la serre et rester au courant des conditions climatiques dans la serre.

Le système de contrôle automatique permet une continuelle surveillance à distance en fournissant les moyens permettant ainsi d'agir rapidement et en temps réel.

I.5 Conclusion

En conclusion, l'agriculture 4.0 représente une véritable révolution dans le domaine agricole. Grâce à l'intégration des technologies numériques et de l'Internet des objets (IoT), les agriculteurs bénéficient d'une gestion plus efficace et intelligente de leurs exploitations.

En fin de compte, l'agriculture 4.0 ouvre de nouvelles perspectives pour l'agriculture moderne, en permettant une agriculture plus durable, efficace et résiliente. C'est une opportunité pour répondre aux défis mondiaux tels que la sécurité alimentaire, la préservation des ressources naturelles et la durabilité environnementale

Chapitre 2
Les jumeaux numériques

II.1 Introduction

De nos jours, les entreprises cherchent constamment à améliorer l'efficacité de leurs opérations et à réduire les coûts, tout en maintenant des niveaux élevés de qualité. Pour y parvenir, elles ont besoin d'outils et de technologies innovants qui leur permettent de surveiller en temps réel leurs processus de production et de maintenance, et de prédire les problèmes potentiels avant qu'ils ne surviennent. C'est là qu'interviennent les jumeaux numériques.

Les jumeaux numériques sont des répliques virtuelles de produits, de processus ou de systèmes physiques, créées à l'aide de données et de modèles informatiques. Ils permettent aux entreprises de surveiller et de simuler en temps réel les performances de leurs machines, de prédire les défaillances et les problèmes potentiels, et de tester et de simuler des scénarios avant de les mettre en œuvre dans le monde réel.

Dans ce contexte, les jumeaux numériques sont devenus un outil essentiel pour les entreprises qui cherchent à transformer numériquement leurs opérations et à se préparer à l'avenir. En utilisant ces technologies, les entreprises peuvent améliorer leur efficacité, réduire les coûts, éviter les temps d'arrêt imprévus et améliorer la qualité de leurs produits et services. Dans ce chapitre, nous allons examiner plus en détail ce que sont les jumeaux numériques, comment ils sont utilisés dans différents secteurs et comment ils peuvent aider les entreprises à atteindre leurs objectifs de performance.

À partir de ce chapitre, il nous sera possible d'expliquer ce qu'est un jumeau numérique, ses types, ses composants et son fonctionnement.

II.2 Jumeau numérique

La première définition du jumeau numérique a été donnée en 2002 par Michael Grieves à l'Université du Michigan dans le cadre d'une présentation de l'industrie concernant la gestion du cycle de vie du produit (PLM) **[15],** ou il expliquait que la représentation numérique devrait inclure de manière optimale toutes les informations concernant le système actif qui pourraient être potentiellement obtenues à partir de son inspection approfondie dans le monde réel. Mais le jumeau numérique existait bien avant, l'ère pionnière de l'exploration spatiale a vu le jour il y a environ 60 ans. À ce moment-là, La NASA avait comme défi de concevoir des objets qui pourraient voyager si loin qu'ils seraient au-delà de la capacité humaine à voir, surveiller ou les modifier directement. La NASA conçut alors un jumeau numérique d'un système physique utilisé pour faire fonctionner, simuler, tester un système sous-jacent. En juillet 1969, la navette Apollo 11 amenant Neil Armstrong sur la lune, était l'un des premiers appareils dotés d'un twin.

Le jumeau numérique (en allemand: digitaliseur Zwilling) **[16]** fut défini pour par la NASA en 2010 comme une simulation d'un véhicule ou d'un système utilisant le meilleur modèle possible afin de représenter l'image de son jumeau réel. Une définition plus détaillée et dans le domaine de la recherche largement reconnue est donnée dans **[17]**: le « jumeau numérique est une simulation multi-physique, multi-échelles et intégrée d'un produit complexe et utilise les meilleurs modèles physiques disponibles, mises à jour par les capteurs pour refléter la vie de son jumeau correspondant. »

En termes de fabrication, la définition suivante d'un jumeau numérique est donnée dans **[18]**: «Le DT consiste en une représentation virtuelle d'un système de production qui est capable de fonctionner sur différentes disciplines de simulation caractérisées par la synchronisation entre le système virtuel et réel, grâce aux données détectées et aux appareils intelligents connectés, aux modèles mathématiques et à l'élaboration de données en temps réel. Le rôle d'actualité dans les systèmes de fabrication de l'industrie 4.0 est d'exploiter ces fonctionnalités pour prévoir et optimiser le comportement du système de production à chaque phase du cycle de vie en temps réel. »

L'industrie et les recherches académiques définissent un jumeau numérique de plusieurs façons différentes. Selon certains, un jumeau numérique est un modèle intégré d'un produit conforme à la construction destiné à refléter les défauts de fabrication et être continuellement mis à jour pour inclure l'usure subie pendant l'utilisation **[19].** D'autres définitions largement diffusées décrivent le jumeau numérique comme un modèle numérique animé par les capteurs d'un objet physique qui simule l'objet dans un cadre réel.

Bien que la terminologie ait changé au fil des ans, le concept de création d'un jumeau numérique et physique en une seule entité est resté le même depuis son émergence. **[20]** Le jumeau numérique est basé sur le monde réel, mesurant en temps réel des données à travers un tableau de bord. Ces mesures nous permettent de visualiser l'évolution de système ou du processus dans le monde numérique, permettant de fournir des informations sur la performance de celui-ci.

Aujourd'hui, les entreprises utilisent de plus en plus les fonctionnalités des jumeaux digitaux des systèmes physiques, permettant de collecter des données grâce à des capteurs, mesurant ainsi le niveau d'usure des systèmes. Mais aussi avancées, et puissantes que ses fonctions soient-elles, l'objectif d'un jumeau numérique reste le même, comprendre les problèmes plus rapidement et procéder de manière pragmatique et rapide aux commandes nécessaires pour résoudre ces problèmes.

Un jumeau numérique diffère des modèles de conception assistée par ordinateur (CAO) ou de la technologie de l'internet des objets (IoT). La conception assistée par ordinateur est totalement encapsulée dans un ordinateur à l'intérieur d'un environnement simulé modélisant des objets et des systèmes plutôt complexes. **[21]** Quant à l'internet des objets, il permet de mesurer la position ou de donner le diagnostic d'un objet donné. Mais aucune des deux technologies ne permet une interaction entre le système réel et le système virtuel. C'est sûrement l'interactivité forte, complète en temps quasi réel entre le monde physique et le monde réel qui constitue la véritable puissance du jumeau numérique. Il peut promettre des modèles riches et réalistes, analysant continuellement le flux de données récoltées. Il peut être utilisé tout au long du cycle de vie du produit en vue de simuler, optimiser et prédire le système de production.

II.3 Présentation générale et fonctionnalité des Jumeaux numériques

Nous pouvons résumer en premier temps la présentation générale du «jumeau numérique» par la figure II.1 :

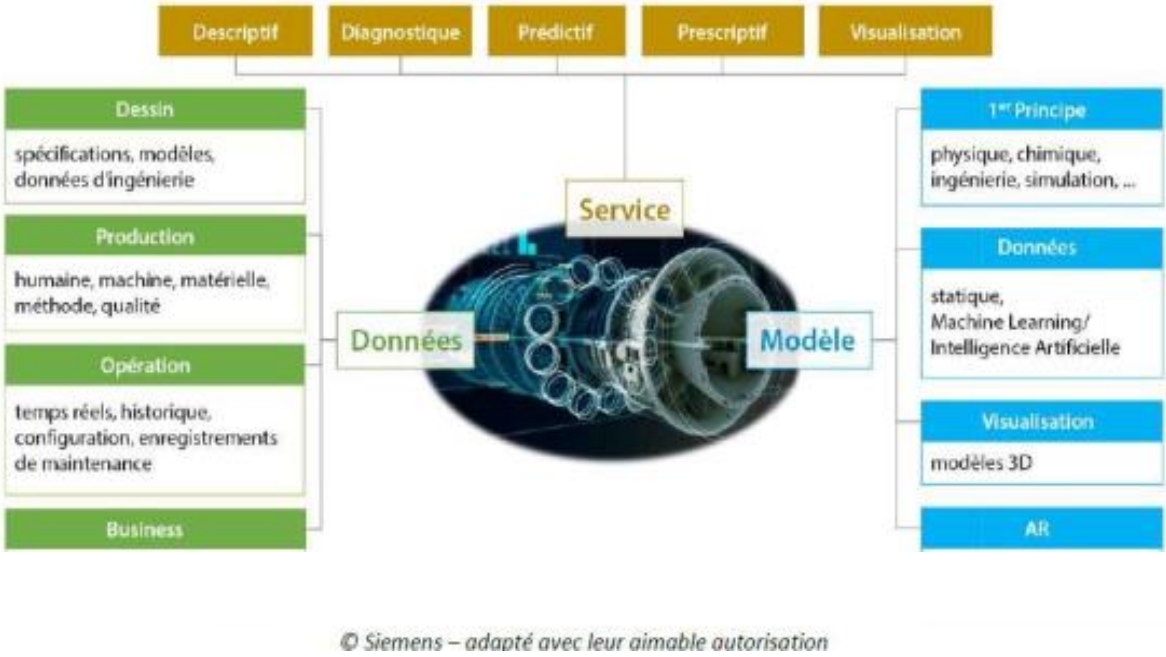


Figure II. 1 Présentation générale du jumeau numérique

En effet, le jumeau se basant sur les données comme les dessins (spécifications, modèles, données d'ingénierie), les productions (méthode, machine, ressource humaine, machine …) doivent se focaliser sur des modèles qui va le paramétrer comme les différents principes (mécaniques, ingénierie), modèles de données (machine learning, deep learning), modèles de visualisation 3D … Ainsi, modèle et données réunies permettront au jumeau de procurer des services que l'on nommera « usages ». Sur ce, les usages affichent un certain degré de maturité

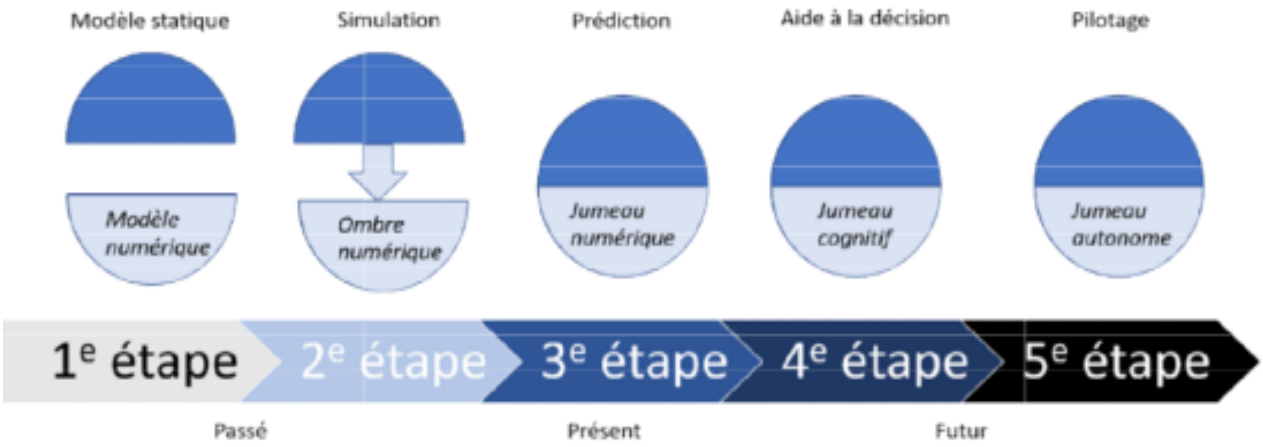


Figure II. 2 Classification du jumeau selon les maturités

qui sont bien différent, mais peuvent être aperçu d'une manière évolutive en engendrant une première classification du jumeau.

D'après cette figure II.2, il y a 5 classifications qui montrent aussi les différentes phases de maturité du jumeau numérique.

II.3.1 Modèle numérique/Miroir numérique

Le miroir numérique est l'origine du jumeau numérique, c'est un ensemble de modèles mathématiques qui s'efforcent de reproduire le plus fidèlement possible le comportement d'un objet physique (produits, équipements, usines) **[22].**

Selon Michael Grieves, le modèle numérique est défini comme une mise en miroir de ce qui existe dans le monde réel et ce qui existe dans le monde virtuel **[23]**. Il contient toutes les informations de l'objet physique, c'est-à-dire une représentation de toutes les disciplines pas seulement mécanique ou géométrique, mais aussi une représentation électronique, du câblage, du logiciel, du micrologiciel…

Les modèles 3D sont un des exemples de miroir numérique. Et dans cette première phase de maturité, il n'y a pas de communication directe entre les 2 mondes, il faudrait une intervention humaine pour alimenter le virtuel des données du monde physique.

II.3.2 Ombre numérique

L'ombre numérique est l'évolution du miroir numérique en incluant une dimension dynamique. Par rapport au modèle numérique, l'ombre représente toute trace digitale de l'activité de l'objet physique grâce à un flux unidirectionnel automatisé allant de l'état de l'objet physique vers sa contrepartie virtuelle **[22]**. Par contre, le flux en sens inverse est encore impossible, mais doit se faire manuellement s'il on veut interagir avec le système physique via l'espace virtuel.

II.3.3 Jumeau numérique : naissance du système cyberphysique

Grâce aux progrès technologiques, surtout au niveau de l'intelligence artificielle et de l'internet des objets ou bien même l'internet industriel des objets favorisant l'interconnexion des équipements industriels et des fonctionnalités de prédiction ; la fusion des deux espaces virtuels et physiques a vu le jour sous le nom de système cyberphysique. Ainsi, les communications entre les deux espaces sont automatiques, par la suite, un changement d'état de l'objet physique conduit directement à un changement d'état de l'objet numérique et vice versa. Le jumeau numérique devient alors un modèle vivant qui reflète les changements de sa contrepartie physique tout au long de sa vie **[22].** Le jumeau devient interactif et intègre le « machine learning » pour permettre d'analyser une masse considérable de données afin d'en tirer des interprétations et des connaissances sur des dysfonctionnements, allant même jusqu'à la prédiction d'événements ou de comportements.

II.3.4 Jumeau numérique cognitif

Connaissant actuellement le fort développement de l'intelligence artificielle (machine learning et deep learning), l'amélioration de jumeau est en train de se réaliser dans le but d'apprendre à des données physiques (historique de données) et de fournir aux utilisateurs une aide à la décision. Cette capacité de réflexion lui donne l'appellation de jumeau numérique cognitif.

I.1.1 Jumeau numérique autonome

Le jumeau autonome est un futur projet consistant à l'autopilotage. C'est-à-dire qu'il a la capacité de prendre lui-même les décisions et d'appliquer les contrôles à l'objet. En d'autres termes, nous assisterons aux déploiements du « strong AI » ou de l'intelligence artificielle forte étant capable de raisonner et résoudre des problèmes comme l'on a vu précédemment.

II.4 Types des jumeaux numériques

Les différentes variétés de jumeaux numériques peuvent être regroupées en quatre catégories principales **[24]:**

II.4.1 Jumeaux d'actifs

Les jumeaux d'actifs décrivent comment les éléments individuels fonctionnent ensemble dans leur ensemble. D'autre part vous permettent de valider le système complet. Ils peuvent être utilisés pour vérifier la compatibilité entre les composants individuels.

II.4.2 Jumeaux système ou jumeaux d'unité

Fonctionnent à un niveau supérieur. Ils combinent divers jumeaux d'actifs individuels et vous offrent la possibilité d'examiner comment ces jumeaux individuels fonctionnent ensemble.

II.4.3 **Jumeaux de processus**

Peut être utilisé pour simuler toute l'opération. Ce n'est qu'à ce niveau que toute la complexité de la surveillance via des jumeaux numériques devient évidente. Après tout, un processus ne devient fonctionnel et efficace que lorsque toutes les unités, tous les actifs et tous les composants remplissent leur objectif.

II.4.4 **Jumeaux de composants**

Les jumeaux de composants représentent chaque élément individuel d'un système, qu'il s'agisse d'un composant matériel, d'un équipement ou d'une machine. Il s'agit d'un survivant parfait et d'un simulateur d'un composant similaire, ainsi que des interactions dans le système mondial.

II.5 **Composants d'un jumeau numérique**

La figure II.3 met en évidence la rotation du flux des données entre, d'un côté, la partie réelle (PHYSICAL) qui se compose de capteurs et d'actionneurs, et de l'autre côté, la partie numérique ou virtuelle (DIGITAL) qui est constamment mise à jour **[25]** .

Les éléments cités ci-dessus sont expliqués comme suit :

II.5.1 **Capteurs**

Distribués tout au long du processus de fabrication créent des signaux qui permettent au jumeau de capturer des données opérationnelles et environnementales relatives au processus physique dans le monde réel.

II.5.2 **Données**

Les données opérationnelles et environnementales du monde réel sont agrégées à partir de capteurs et combinées aux données de l'organisation.

II.5.3 **Intégration**

Les capteurs fournissent des données au monde numérique grâce à la technologie d'intégration entre le monde physique et le monde numérique.

II.5.4 **Analytique**

Les techniques analytiques sont utilisées pour analyser les données à travers les simulations informatiques et les procédures de visualisation utilisée par le jumeau numérique pour produire des informations.

II.5.5 **Actionneurs**

Si une action est justifiée dans le monde réel, le jumeau numérique produit l'action au moyen d'actionneurs, soumis à une intervention humaine, qui déclenche le processus physique.

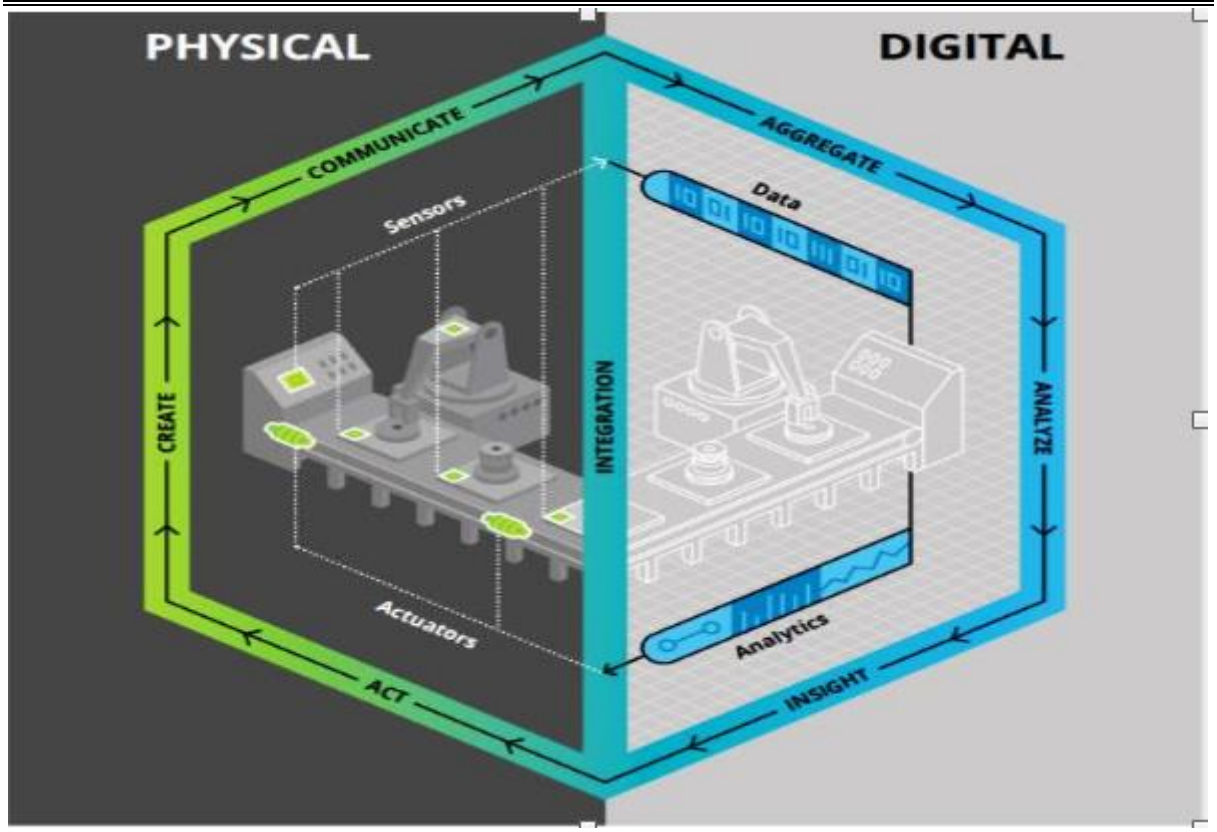


Figure II. 3 Processus de fabrication modèle de jumeau numérique

II.6 Avantages des jumeaux numériques

L'utilisation des jumeaux numériques présente de nombreux avantages logistiques qui améliorent la rentabilité de toute la chaîne d'approvisionnement **[26].**

- Augmentation de la productivité : les jumeaux numériques peuvent détecter les goulots d'étranglement et autres difficultés opérationnelles.
- Identification d'axes d'amélioration : il est possible d'analyser l'entrepôt dans un cadre virtuel, d'y introduire des éléments ou de modifier des stratégies, puis de les appliquer dans le monde réel afin d'améliorer les processus.
- Prévenir les erreurs : grâce aux jumeaux numériques, il est possible d'anticiper et d'éviter les problèmes avant qu'ils ne se posent, évitant ainsi toute interruption d'activité qui aurait pour conséquence un coût économique élevé et une mauvaise image pour la marque. Autrement dit, ils représentent un atout considérable dans l'analyse prédictive de l'activité
- Contrôle des stocks : il est possible d'anticiper la réaction de la chaîne logistique face aux pics de demande, évitant ainsi les ruptures de stocks.

- Économies : il est clair qu'en testant une opération dans un milieu virtuel plutôt que directement dans l'entrepôt, on réalise des économies.
- Suivi de l'activité : l'essor de l'Internet des Objets (IoT) permet à chaque élément impliqué dans l'entrepôt d'être connecté en permanence et de générer une grande quantité de données (big data) et de pouvoir suivre en temps réel la progression de la chaîne logistique.

II.7 Défis

Bien que l'implémentation de la maintenance prédictive par le biais d'un jumeau numérique offre de nombreux avantages, son déploiement peut poser les défis suivants:

Un jumeau numérique doit refléter précisément toutes les propriétés d'un jumeau physique, y compris celles mécaniques (pression d'aspiration, température de conception, etc.) et électriques (capacité, conductivité, etc.).

Des plans détaillés des défaillances d'une machine sont nécessaires. Pour prévoir les défaillances, un jumeau numérique doit être alimenté avec des données sur les modes de défaillance de l'équipement. Ces données doivent être collectées pendant une longue période pour observer une machine tout au long de son processus de dégradation.

Un jumeau numérique nécessite un remodelage avec tout changement dans la configuration ou l'état de l'élément de l'équipement. Toute modification affectant les performances de l'équipement nécessite un changement de son modèle et des algorithmes sous-jacents. De telles modifications au niveau de la machine ou au niveau de l'usine ne sont pas toujours reflétées dans les spécifications de l'usine, donc, ne peuvent pas être simulées avec précision, ce qui intensifie le risque d'erreurs.

Bien que le déploiement d'une maintenance prédictive basée sur le jumeau numérique nécessite beaucoup de temps et de travail, la technologie offre la possibilité de reconnaître en temps opportun les perturbations des performances des actifs, de prévoir les problèmes potentiels et de simuler divers scénarios de maintenance. Il aide les entreprises à éliminer les temps d'arrêt des machines, à réduire les coûts de maintenance des équipements, à améliorer la fiabilité des équipements et à prolonger leur durée de vie.

La complexité de l'utilisation de l'intelligence artificielle dans l'automatisation industrielle nécessite que les fabricants collaborent avec des spécialistes pour trouver des solutions personnalisées.

Pour cela un certain nombre d'éléments doivent être considérés pour répondre aux besoins de l'implémentation :

- Collecte de données historiques
- Capture de données en direct via des capteurs
- Agrégation de données
- Connectivité via les protocoles de communication Intégration avec les automates
- Applications IA: apprentissage automatique et autres techniques

II.8 Jumeau numérique : mise en œuvre de plusieurs technologies

Le jumeau numérique étant un concept impliquant un grand nombre de technologies qui sont toutes interdépendantes entre eux :

- Des modèles mathématiques et visuels (2D,3D) pour synthétiser une reproduction de l'architecture de l'entité physique.
- L'internet industriel des objets incluant l'internet des objets, et le cloud pour l'interconnexion des machines (M2M) ainsi que la communication bidirectionnelle entre l'espace virtuel et physique.
- L'intelligence artificielle en utilisant le « machine learning » et le « deep learning » par le biais de plusieurs algorithmes, en assurant le bon fonctionnement des modèles tant au niveau de la prédiction que de l'aide à la décision allant jusqu'à la cognition.
- Le Big Data accompagné des smart Data et lean Data pour représenter les données
- Les logiciels d'entreprise comme les CRM, ERP et les GPAO pour le pilotage et contrôle manuel par les clients utilisateurs, ils peuvent aussi être utilisés avec l'internet des objets pour assurer l'interaction homme-machine (IHM)

Tout ceci sera résumé par l'illustration de la figure II.4

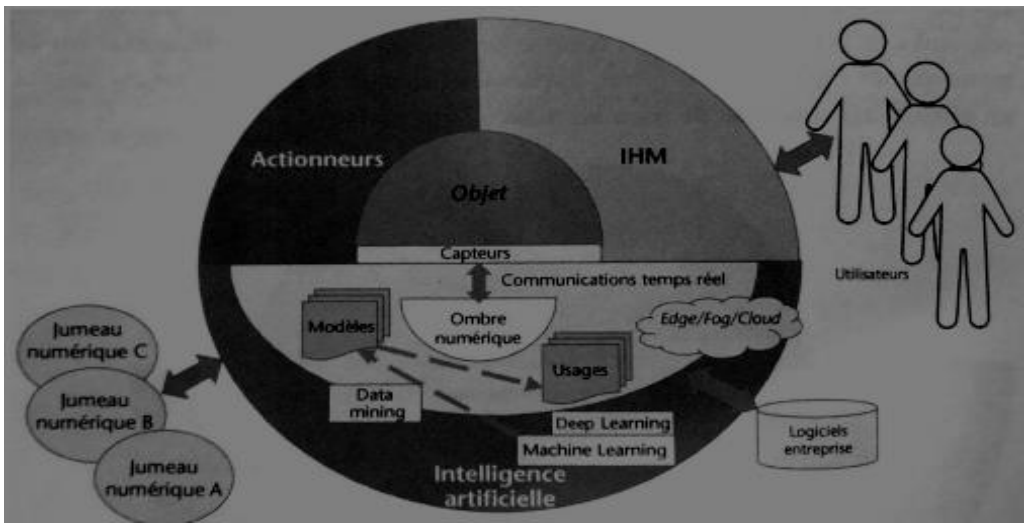


Figure II. 4 Architecture générale d'un jumeau numérique

II.9 Domaines d'application des jumeaux numériques

Aujourd'hui, de nombreuses organisations de différents secteurs ou secteurs utilisons jumeaux numériques pour simplifier, améliorer, automatiser et contrôler différents processus objets **[24].**

Ensuite, nous montrons quelques domaines qui bénéficier pratiques de l'Internet des objets :

II.9.1 Industrie :

Selon l'industrie et le milieu universitaire, les jumeaux numériques sont en train de s'imposer comme l'une des technologies clés de la quatrième révolution industrielle (également connue sous le nom d'industrie 4.0 figure II.5) [27]. Par exemple, Hofmann et Rüsch ont identifié les concepts suivants de l'industrie 4.0 sur la base de leur revue systématique de la littérature (SLR) : les systèmes cyber-physiques (CPS), l'Internet des objets (IoT), l'Internet des services (IoS) et l'usine intelligente. . Les CPS sont des systèmes qui connectent le monde virtuel et physique sur une base de réseau ; certains DT pourraient donc être considérés comme des CPS.



Figure II. 5 Jumeau numérique d'usine

II.9.2 Santé et bien-être

Les jumeaux numériques peuvent être utilisés pour surveiller et optimiser la santé et le bien-être des individus, en collectant des données sur les comportements, les habitudes alimentaires, les niveaux d'activité, le sommeil et les paramètres physiologiques, pour aider les gens à prendre des décisions plus éclairées sur leur santé.

II.9.3 Automobile

L'industrie automobile pourra bénéficier d'avantages considérables en utilisant des applications basé sur les jumeaux numériques (Figure II.6). Au-delà des avantages obtenus

par ses l'application, des capteurs peuvent détecter l'imminence de pannes sur des véhicules déjà en circulation, ainsi qu'alerter le conducteur en lui fournissant des détails et des recommandations. Grâce aux informations agrégées collectées par des applications reposant sur utilisons jumeaux numériques.

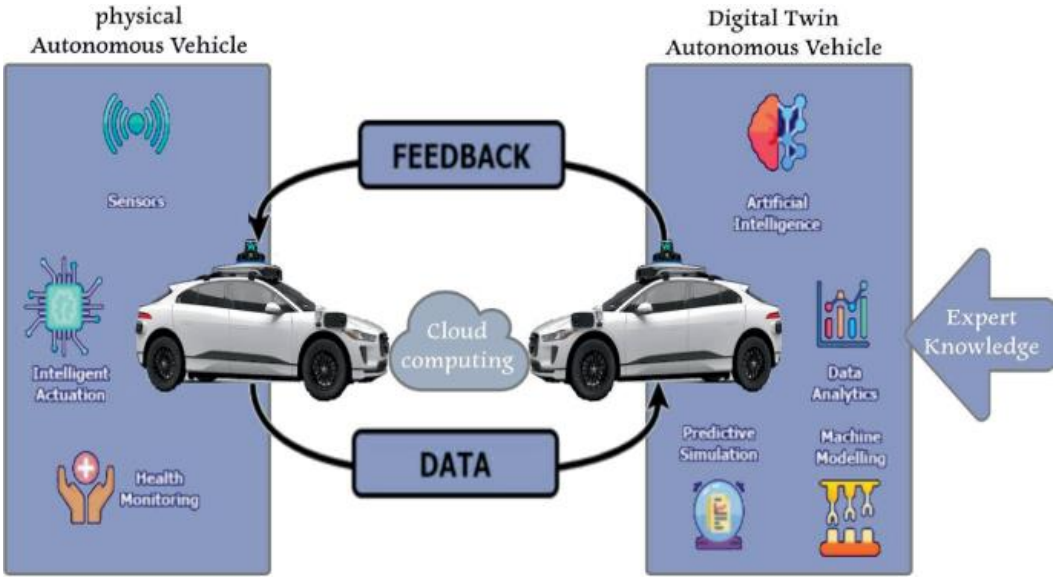


Figure II. 6 jumeaux numériques d'une automobile

II.9.4 **Transport et logistique**

Les systèmes de transport et de logistique bénéficient d'une grande diversité d'applications applications basé sur les jumeaux numériques. Les parcs de voitures, camions, navires et trains qui transportent du stock peuvent être réacheminés en fonction des conditions météo, ou encore de la disponibilité des véhicules ou des chauffeurs grâce aux données envoi par les capteurs. Le stock lui-même peut également être muni de capteurs en vue de son suivi, ou à des fins de contrôle de température

II.9.5 **Commerce**

Les applications basées sur les jumeaux numériques permettent aux entreprises de la grande distribution de gérer leurs stocks, d'améliorer l'expérience client, d'optimiser la supply chain et de réduire les coûts d'exploitation. Par exemple, des rayons intelligents pourvus de capteurs de poids peuvent collecter des informations par radio-identification (RFID) et envoyer les données à la plateforme pour surveiller automatiquement les stocks et déclencher des alertes si la quantité d'articles commence à baisser.

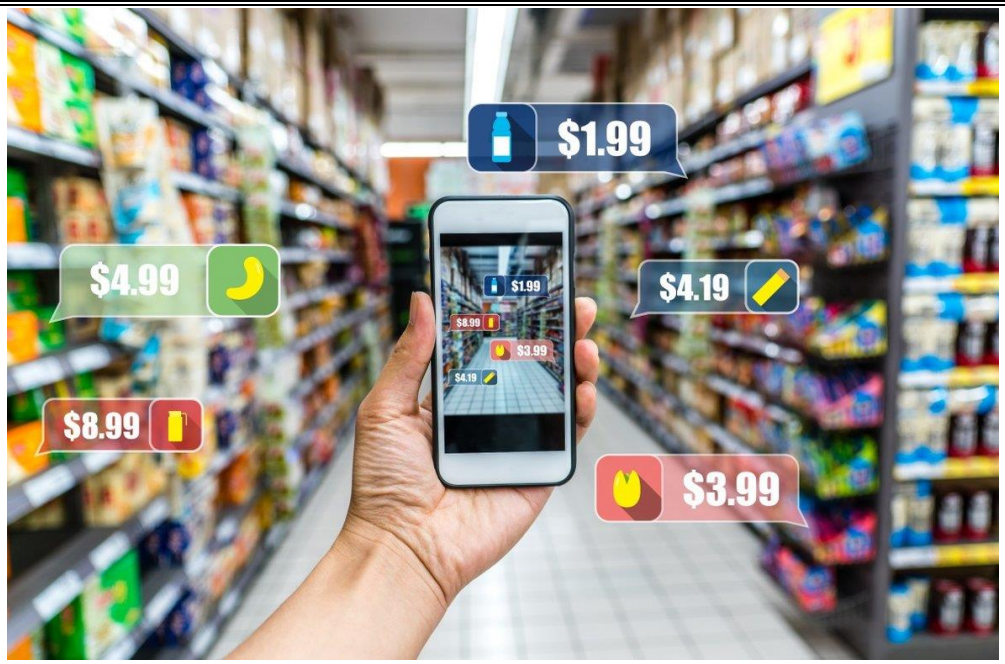


Figure II. 7 Utilisation des jumeaux numérique pour commerce

II.9.6 Secteur public

Les avantages des jumeaux numériques dans le secteur public et les autres environnements de service sont tout aussi vastes. Par exemple, certains services publics peuvent utiliser des applications basées sur les jumeaux numériques pour avertir leurs utilisateurs de pannes à grande échelle, voire de coupures plus brèves d'eau, d'électricité ou des services d'assainissement.



Figure II. 8 City intelligent

II.9.7 Agriculture

Le jumeau numérique est une technologie qui suscite un intérêt croissant dans le domaine de l'agriculture. Cette technologie permet de créer des répliques numériques précises de systèmes physiques tels que des cultures, des parcelles de terrain ou des équipements agricoles. Les données collectées à partir de capteurs et d'autres sources sont

utilisées pour modéliser et simuler le comportement de ces systèmes, ce qui permet aux agriculteurs de prendre des décisions plus éclairées.

Les applications du jumeau numérique en agriculture sont nombreuses et variées. Il peut être utilisé pour la modélisation de cultures, la gestion des ressources (eau, fertilisants), la surveillance des maladies et des parasites, ou encore pour la planification de la production agricole. En utilisant des jumeaux numériques, les agriculteurs peuvent simuler différentes situations et scénarios, et ainsi identifier les pratiques les plus efficaces pour maximiser les rendements, minimiser les pertes et améliorer la durabilité.

Plusieurs études ont été menées sur l'utilisation du jumeau numérique en agriculture, notamment dans des revues scientifiques telles que Biosystems Engineering et Precision Agriculture. Ces études montrent que le jumeau numérique offre un potentiel considérable pour améliorer la production agricole et aider les agriculteurs à relever les défis environnementaux et économiques auxquels ils sont confrontés.

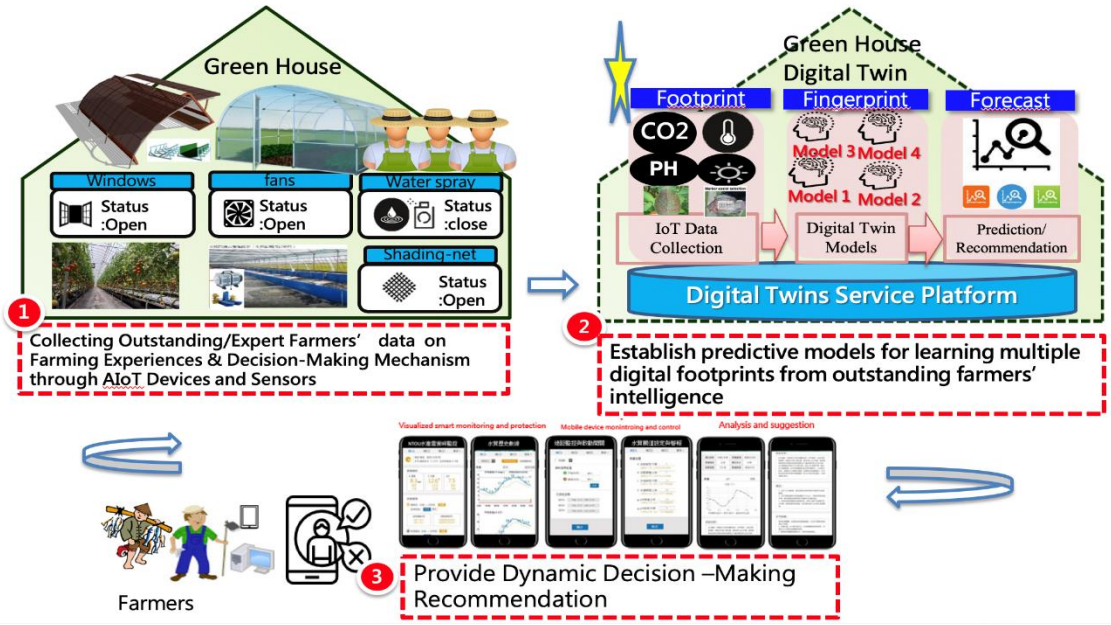


Figure II. 9 Jumeau numérique d'une serre intelligent

II.10 Différentes couches du jumeau numérique

Les jumeaux numériques sont des représentations virtuelles des objets physiques et des systèmes en temps réel. Ils sont composés de trois couches (figure II.10) qui interagissent pour fournir une version complète et précise de l'objet ou du système. Voici les principales couches des jumeaux numériques :

II.10.1 Couche physique

Cette couche représente l'aspect physique ou réel de l'objet, du système ou du processus que le jumeau numérique représente. Elle englobe les composants matériels, les machines, les infrastructures physiques, les capteurs, etc. Les données provenant de cette couche sont collectées à l'aide de capteurs et d'autres dispositifs de surveillance.

II.10.2 Couche numérique

Cette couche est la représentation virtuelle ou numérique de la couche physique. Elle utilise des modèles et des simulations pour reproduire le comportement, les caractéristiques et les interactions de la couche physique. Les données de cette couche comprennent des modèles géométriques, des propriétés physiques, des algorithmes, des logiciels, etc.

II.10.3 Couche de communication

Cette couche assure la communication bidirectionnelle entre la couche physique et la couche numérique. Elle permet la collecte des données provenant de la couche physique, la mise à jour des modèles dans la couche numérique, et la transmission des instructions ou des actions de la couche numérique à la couche physique. Les technologies de communication utilisées peuvent inclure l'IoT (Internet des objets), les réseaux sans fil, les protocoles de communication, etc.

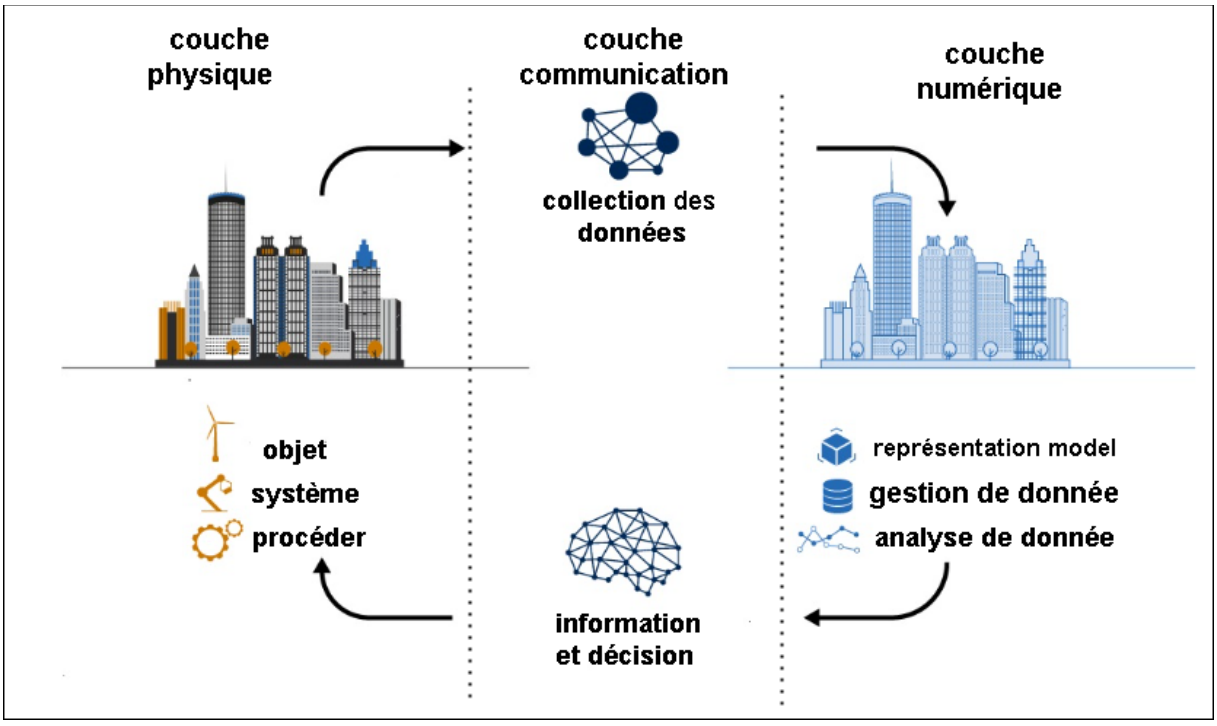


Figure II. 10 Couches d'un jumeau numérique

II.11 Plateformes de jumeaux numériques

Il existe plusieurs plateformes utilisées pour développer des jumeaux numériques.

II.11.1 **AWS IoT**

AWS IoT TwinMaker est un service AWS IoT que vous pouvez utiliser pour créer des jumeaux numériques opérationnels de systèmes physiques et numériques. AWS IoT TwinMaker crée des visualisations numériques à l'aide de mesures et d'analyses à partir d'une variété de capteurs, de caméras et d'applications d'entreprise du monde réel pour vous aider à suivre votre usine physique, votre bâtiment ou votre installation industrielle. Vous pouvez utiliser ces données du monde réel pour surveiller les opérations, diagnostiquer et corriger les erreurs et optimiser les opérations.[34].

II.11.2 **Azure Digital Twins**

Azure Digital Twins est une plateforme Internet des objets (IoT) qui vous permet de créer une représentation numérique d'objets, de lieux, de processus métier et de personnes du monde réel. Obtenez des insights qui vous aideront à améliorer les produits, à optimiser les opérations et les coûts et à créer des expériences client exceptionnelles.[35]

II.11.3 **Ditto**

Eclipse Ditto™ est une technologie de l'IoT implémentant un modèle logiciel appelé « jumeaux numériques ».

Un jumeau numérique est une représentation virtuelle, basée sur le cloud, de son homologue du monde réel (« Objets » du monde réel, par exemple des appareils tels que des capteurs, un chauffage intelligent, des voitures connectées, des réseaux intelligents, des bornes de recharge pour véhicules électriques, …).

Avec Ditto, une chose peut simplement être utilisée comme n'importe quel autre service Web via son jumeau numérique.[36]

II.11.4 **Siemens MindSphere**

MindSphere est une plateforme IoT de Siemens qui permet de connecter les appareils industriels à des applications cloud pour la surveillance et l'analyse des données. La plateforme prend en charge la création de jumeau numérique pour les machines et les processus industriels, permettant la surveillance et l'optimisation de la performance.

II.11.5 **PTC ThingWorx:**

ThingWorx est une plateforme IoT de PTC qui permet de connecter les appareils à des applications cloud pour la surveillance et l'analyse des données. La plateforme prend en charge la création de jumeau numérique pour les machines et les équipements industriels, ainsi que pour les environnements de production et de fabrication.

II.11.6 **Altair smartworks**

Altair possède les connaissances et la technologie pour vous aider à réaliser votre vision de développement de produits intelligents du début à la fin, de la conception à l'optimisation, jusqu'au lancement et à l'exploitation. Les solutions de conception pilotées par simulation d'Altair offrent une approche plus intelligente pour le développement de produits électroniques, en abordant les défis et en intégrant l'optimisation à tous les aspects du processus de développement, de la conception de PCB à l'emballage et à la faisabilité de la fabrication. Combinées aux logiciels de développement de systèmes électroniques, aux outils d'optimisation mécanique et multiphysique et à la technologie de conception pour la fabrication, les utilisateurs disposent d'un ensemble complet de solutions pour développer des produits intelligents innovants de haute qualité plus rapidement et plus efficacement sur le plan des coûts. Si vous êtes intéressé par le processus de développement de systèmes électroniques, y compris la conception de matériels et de micrologiciels électroniques, ainsi que les capteurs, actionneurs et antennes sur l'appareil, téléchargez le guide de développement de systèmes électroniques: Développement rapide de produits pour les appareils connectés intelligents. [37]

II.12 **Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons exploré les concepts fondamentaux des jumeaux numériques et découvert leur rôle essentiel dans la supervision, le contrôle et la prédiction du comportement des systèmes physiques. Nous nous sommes particulièrement concentrés sur l'application des jumeaux numériques dans le domaine de l'agriculture. À travers cette exploration, nous avons mis en évidence les avantages et les opportunités offertes par cette technologie pour optimiser les processus agricoles, améliorer la productivité et réduire les coûts.

Le chapitre suivant approfondira notre compréhension en présentant en détail le jumeau numérique que nous avons spécifiquement développé pour notre contexte agricole

Chapitre 3
Conception et Implémentation

III.1 Introduction

La révolution numérique a un impact significatif sur tous les secteurs de l'économie, y compris l'agriculture. L'émergence de technologies avancées telles que l'IoT, l'intelligence l'IA et l'analyse de données a ouvert de nouvelles possibilités pour améliorer l'efficacité et la durabilité des activités agricoles. Dans ce contexte, le concept de "digital twin" (jumeau numérique) a émergé comme une innovation prometteuse dans le domaine de l'agriculture

Ce chapitre présente en détail les étapes de conception et d'implémentation de notre système proposé, basé sur un jumeau numérique, pour une gestion efficace d'un environnement agricole.

III.2 Cahier de charge

Afin de réaliser notre système de gestion intelligente basé sur un jumeau numérique, nous avons établi des lignes directrices qui servent d'exigences pour notre projet, permettant ainsi de clarifier et préciser l'objectif de ce travail.

1) Déploiement d'un système de collecte et d'émission de données :
   - Mettre en place des capteurs et des dispositifs de collecte de données dans l'environnement agricole.
   - Assurer une transmission fiable et sécurisée des données collectées vers le système central.
2) Conception d'un système de stockage de données basé sur l'IoT :
   - Élaborer une infrastructure (un système) de stockage adapté pour les données agricoles collectées.
   - Garantir la disponibilité et l'intégrité des données stockées.
3) Développement d'un modèle de la serre :
   - Créer un modèle virtuel représentant la serre agricole, en tenant compte de ses caractéristiques physiques et des différents paramètres environnementaux.
4) Conception d'une interface homme-machine (IHM) basée sur un jumeau numérique pour la supervision, le contrôle et l'analyse de données à distance :
   - Concevoir une interface conviviale permettant aux utilisateurs d'accéder au jumeau numérique de la serre et d'effectuer des opérations de supervision et de contrôle à distance.
   - Intégrer des fonctionnalités d'analyse de données pour permettre l'interprétation et l'exploitation des données agricoles.

III.3 **Système proposé**

Figure III.1 illustre l'architecture générale de notre projet. Notre projet repose sur l'utilisation de la plateforme Firebase, du NodeMCU ESP8266 et de la bibliothèque React. Dans un premier temps, les capteurs (DHT11, humidité du sol, MQ-7, etc.) sont utilisés pour collecter les données environnementales telles que la température, l'humidité et la luminosité. Ces capteurs sont connectés à la carte électronique NodeMCU ESP8266, qui à son tour envoie les données collectées vers Firebase en utilisant les protocoles de communication WebSocket.

Les données collectées sont ensuite stockées dans Firebase Realtime Database et Firestore Database. Une structure de base de données appropriée est mise en place pour stocker les données collectées. Des nœuds distincts sont créés pour chaque type de capteur et d'actionneur afin de faciliter l'accès et la mise à jour en temps réel des données.

L'interface utilisateur est développée à l'aide de React. Elle se connecte à Firebase pour récupérer les données stockées dans la base de données. Les données collectées sont présentées de manière conviviale à travers des tableaux ou d'autres visualisations pertinentes. L'interface utilisateur offre également des fonctionnalités de contrôle permettant aux utilisateurs d'interagir avec le système, notamment en activant ou désactivant les actionneurs.

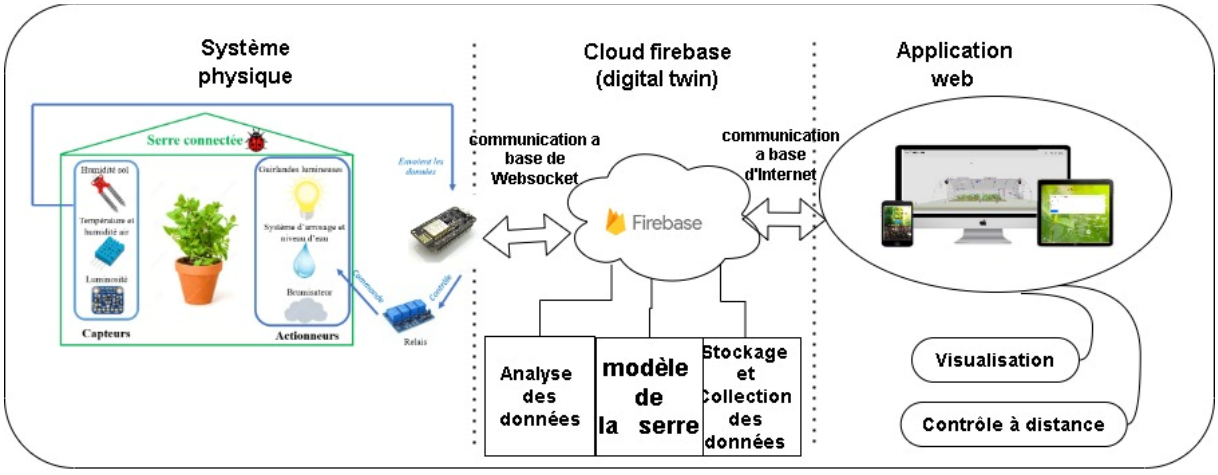


Figure III. 1 Architecture générale de système proposé

III.4 **Implémentation**

Notre projet est divisé en trois partie (couche physique et communication, couche digital twin et application web) comme présente sur la figure III.1.

III.4.1 Couche physique et communication

Pour commencer à utiliser la carte électronique ESP8266, il doit installer l'Arduino IDE et le configurer pour programmer notre carte (voir l'Annexe 2). Ensuite nous avons suivi les étapes suivantes :

- Inclure les bibliothèques

Tout d'abord, nous avons inclus les bibliothèques requises (Figure III.2).

- Le ESP8266WiFi.h bibliothèque pour connecter l'ESP8266 à Internet (ou le WiFi.h dans le cas de la carte ESP32) et l
- Firebase_ESP_Client.h bibliothèque pour interfacer la carte avec Firebase.

```
#include <Arduino.h>
#if defined(ESP32)
#include <WiFi.h>
#elif defined(ESP8266)
#include <ESP8266WiFi.h>
#endif
#include <Firebase_ESP_Client.h>
```

Figure III. 2 Partie du programme Arduino

- Inclure l'identification réseau

Nous avons inclus nos informations d'identification réseau (Figure III.3)

```
#define WIFI_SSID "************"
#define WIFI_PASSWORD "***************"
```

Figure III. 3 Configuration de Wi-Fi sur Arduino

- Insertion la clé API de notre projet Firebase et l'URL de notre base de données (Figure III.4)

```
// Insert Firebase project API Key
#define API_KEY "REPLACE_WITH_YOUR_FIREBASE_PROJECT_API_KEY"

// Insert RTDB URLefine the RTDB URL */
#define DATABASE_URL "REPLACE_WITH_YOUR_FIREBASE_DATABASE_URL"
```

Figure III. 4 Connecter d'esp8266 au firebase

L'organigramme de la figure III-5 présente la démarche de notre programme

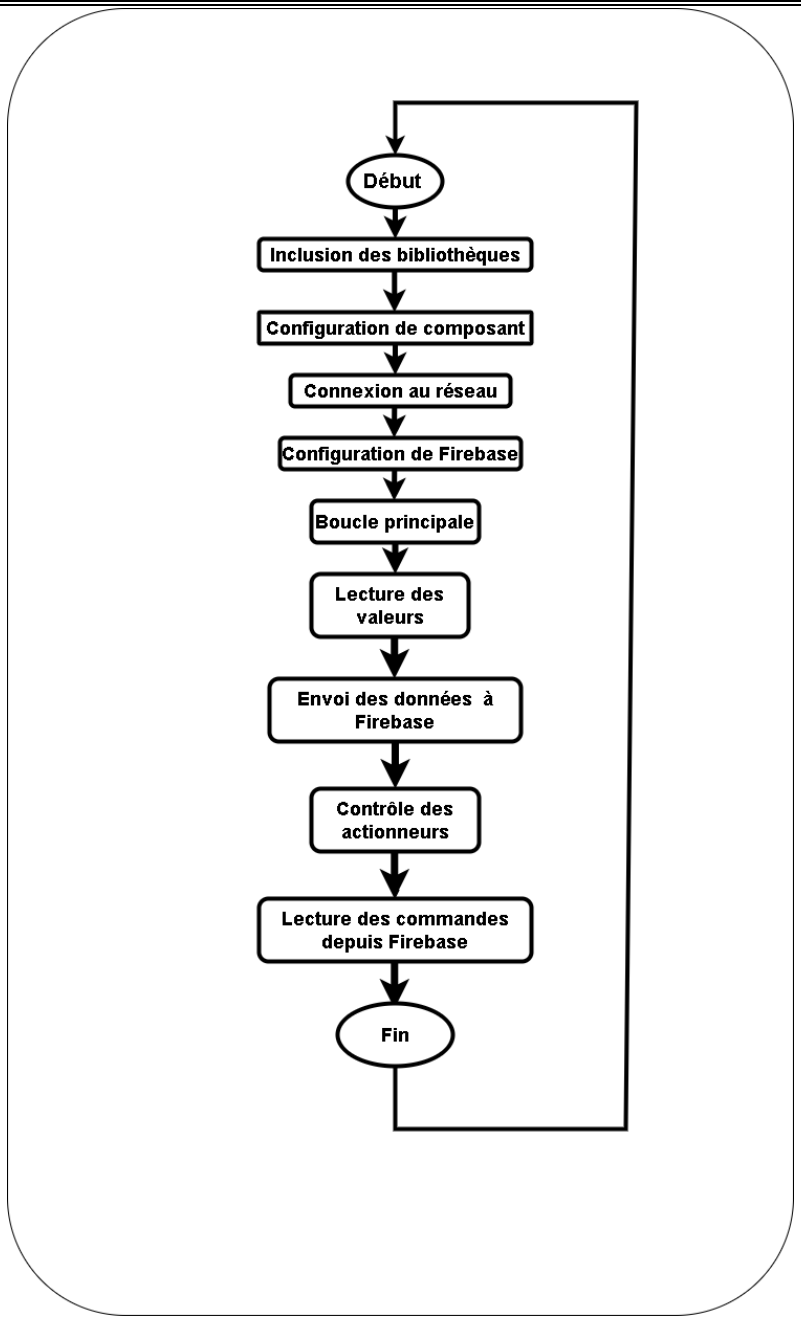


Figure III. 5 Organigramme de programme Arduino

Une fois la compilation du programme terminée, nous procédons au câblage conformément à ce qui est illustré sur la figure III.6. Le microcontrôleur NodeMCU ESP8266 dispose d'une seule entrée analogique, c'est pourquoi nous avons utilisé le multiplexeur CD4051 pour câbler les capteurs. Le multiplexeur permet de sélectionner et de commuter entre plusieurs entrées analogiques, ce qui nous permet de connecter plusieurs capteurs à une seule broche d'entrée analogique du microcontrôleur.

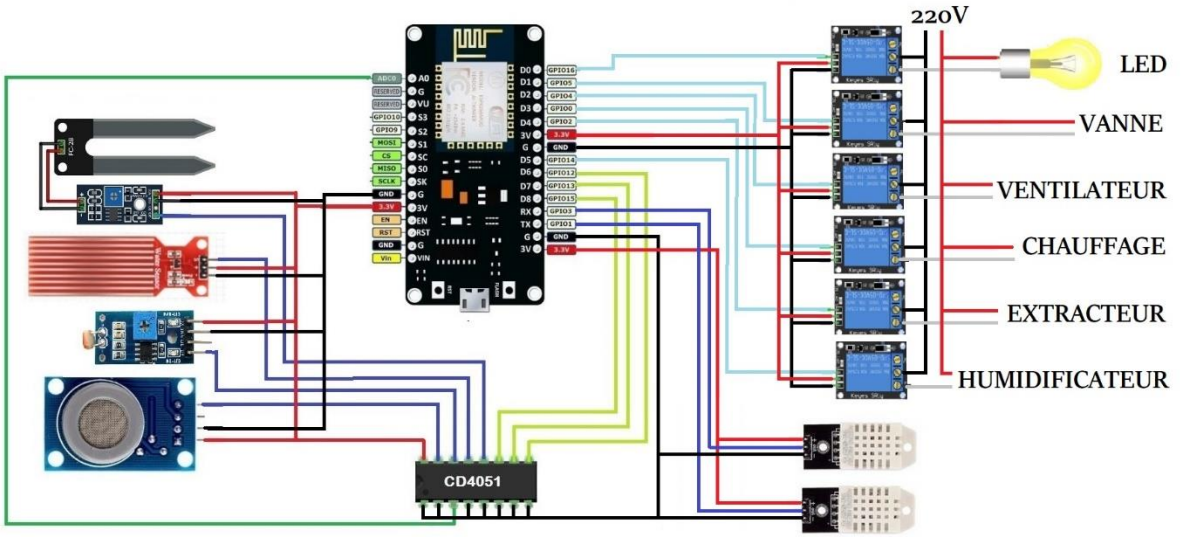


Figure III. 6 Câblage des capteurs et actionneurs avec le NodeMCU ESP8266

III.4.2 **Couche de jumeau numérique**

Nous avons utilisé la plateforme Firebase dans notre projet, qui est une technologie de l'IoT. Cette couche est devisée en plusieurs parties :

III.4.2.1 **Configuration du projet Firebase**

Nous avons créé un projet Firebase sur la console Firebase (https://console.firebase.google.com/) et configuré les paramètres nécessaires. (Voir l'annexe 1)

III.4.2.2 **Ajout de Firebase à notre application IoT**

Nous avons ajouté la bibliothèque Firebase à notre projet. Dans notre application, nous avons installé la bibliothèque Firebase sur l'Arduino IDE et Vs Code.

III.4.2.3 Authentification et **autorisation**

Firebase prend en charge plusieurs méthodes d'authentification pour les utilisateurs, y compris l'authentification par adresse e-mail et mot de passe, l'authentification avec des fournisseurs tiers, l'authentification anonyme, etc. Dans notre projet, nous avons utilisé l'authentification par adresse e-mail et mot de passe, comme indiqué sur la figure III.7.

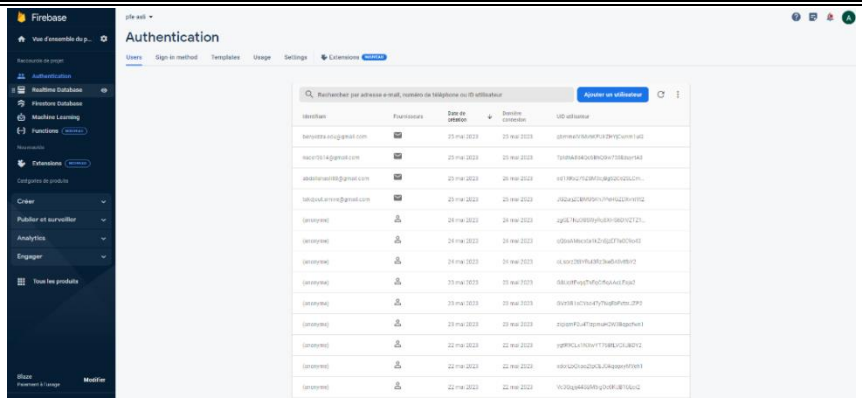


Figure III. 7 Utilisateurs autorise

III.4.2.4 **Stockage des données**

Dans notre projet, nous avons utilisé la plateforme Firebase pour le stockage des données, en utilisant les services suivants :

- Realtime Database : Nous utilisons Realtime Database pour afficher les données en temps réel. Cela nous permet de mettre à jour les données en temps réel et de les afficher instantanément dans notre application. Des informations plus détaillées sont disponibles dans l'annexe.
- Firestore Database : Nous utilisons Firestore Database pour stocker les données. Il s'agit d'une base de données NoSQL qui stocke les données dans des collections et des documents au format JSON. Cela nous permet de structurer et d'organiser nos données de manière flexible et d'y accéder facilement.

III.4.2.5 **Modèle dynamique du climat des serres**

L'environnement de la serre est un système dynamique complexe. Au cours des dernières décennies, les gens ont acquis une compréhension considérable de la dynamique du climat à effet de serre, et de nombreuses méthodes décrivant le processus dynamique du climat à effet de serre ont été proposées. Traditionnellement, il existe deux approches différentes pour le décrire; l'un est basé sur les équations de flux d'énergie et de masse décrivant le processus [37, 38-40], et l'autre est basé sur l'analyse des données d'entrée-sortie du processus en utilisant une approche d'identification du système [41-43]. Notre projet traite de la première méthode pour la température et l'humidité de l'air intérieur d'une serre, et son modèle physique (Figure III.8) décrit les transferts de flux et de masse générés par les différences de contenu énergétique et massique entre l'air intérieur et l'air extérieur [44]. La plupart des modèles analytiques d'analyse et de contrôle de l'environnement à l'intérieur des serres ont été basés sur la forme d'espace d'état suivante : $i = f(t, x, u, v)$

où sont des variables d'état telles que la température intérieure, l'humidité et la concentration de dioxyde de carbone, u sont des entrées de contrôle telles que l'apport d'énergie par le système de chauffage, les systèmes de brumisation, le système de ventilation et le flux d'alimentation en CO2, v sont des perturbations externes telles que le rayonnement solaire, la température extérieure, l'humidité et le vent la vitesse, t désigne le temps et $f(\cdot)$ est une fonction non linéaire.

Afin de valider efficacement les performances de l'algorithme proposé ci-dessous, l'expression analytique de la serre considérée est basée sur le modèle de chauffage/refroidissement/ventilation de ce travail, qui peut être obtenu à partir de nombreuses littératures existantes [37,38]. Il peut être résumé dans le schéma fonctionnel donné à la figure 1. Compte tenu des coûts élevés associés, les systèmes d'approvisionnement en CO2 n'ont pas une utilisation extensive, par conséquent, les variables associées ne sont pas prises en compte dans ce travail. Pour simplifier le modèle, nous ne considérons que certaines variables primaires de perturbation, telles que le rayonnement solaire, la température extérieure et l'humidité. Après normalisation des variables de contrôle, nous considérons le modèle dynamique de serre présenté dans [37] en utilisant les équations différentielles suivantes

$$\frac{dT_{in}}{dt} = \frac{1}{C_0}\left[S,(t) - \lambda Q_{\%fog}(t)\right] - \left(\frac{V_{R\%}(t)}{t_v} + \frac{UA}{C_0}\right).[T_{in}(t) - T_{out}(t)] \text{.....(1)}$$

$$\frac{dH_{in}}{dt} = \frac{Q_{\%fog}(t)}{V'} + \alpha' S,(t) - \frac{V_{R\%}(t)}{t_v}.[H_{in}(t) - H_{out}(t)] \text{ .....(2)}$$

T_{in}/T_{out} est la température de l'air intérieur/extérieur (°C),

H_{in}/H_{out} est le taux d'humidité intérieur/extérieur ($g[H_2O]\ kg^{-1}_{dry_{air}}$),

UA est le coefficient de transfert de chaleur de l'enceinte (WK^{-1}),

$C_0 = \rho C, V_{TH}$, ici ρ et Cp sont la densité de l'air (1.2 kgm^{-3}) et la chaleur spécifique de l'air (1,006 $Jkg^{-1}_{dry_{air}}$),), respectivement.

V_{th} est le volume d'air mélangeant activement la température et l'humidité. Généralement V_{th} est petit comme 60%-70% du volume géométrique V (m3) de la serre.

S est l'énergie rayonnante solaire interceptée (W),

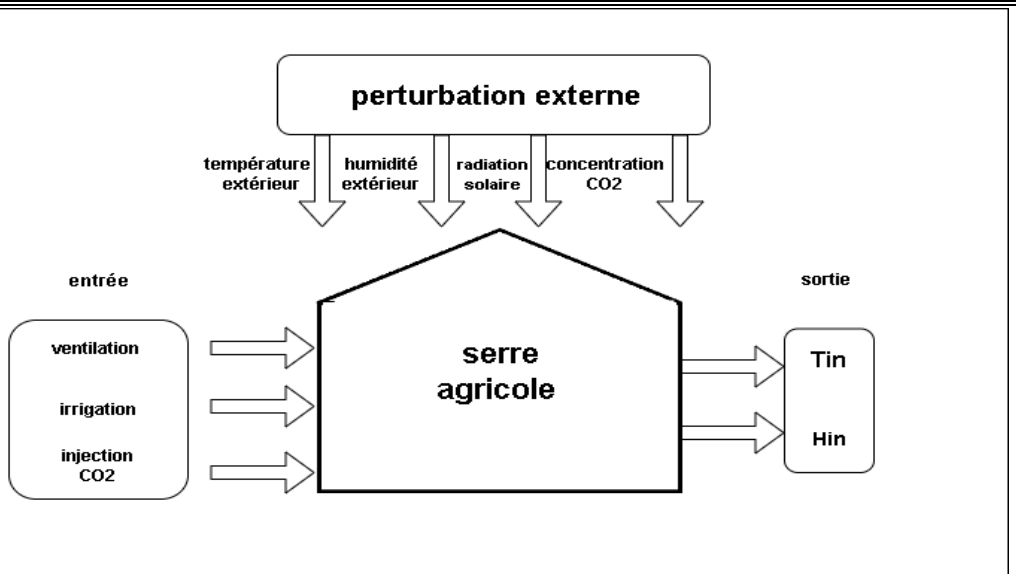


Figure III. 8 Modèle dynamique de serre

Le taux d'aération V_R est mesuré en pourcentage du taux de ventilation maximal ${V_R}^{max}$

(i.e…), $V_R = V_{R\%}$, ${V_R}^{max}$; Semblable à ce que$V_{R\%}$, nous définissons $Q_{\%fog}$comme un pourcentage de la capacité maximale du système de brouillard ${Q_{\%fog}}^{max}$

III.4.2.5.1 Développement de modèle

Nous avons programmé ce modèle en utilisant un programme Python qui repose sur les bibliothèques mentionnées dans la figure III.9. Ces bibliothèques ont été incorporées dans notre code Python afin de bénéficier de leurs fonctionnalités spécifiques. Elles nous ont permis d'accéder à des fonctions prédéfinies, des méthodes et des outils spécialisés pour résoudre les problèmes liés au modèle mathématique. Nous avons configuré Firebase pour importer et déployer ce programme Python, conformément à ce qui est pré1senté dans la figure III.10. Dans la figure, on observe une clé qui est utilisée sur le modèle pour se connecter à Firebase.

```
import time
import control as control
import numpy as np
from threading import Thread, Lock
import firebase_admin
from firebase_admin import credentials
from firebase_admin import db
```

Figure III. 9 Bibliothèques utilisé pour le modèle

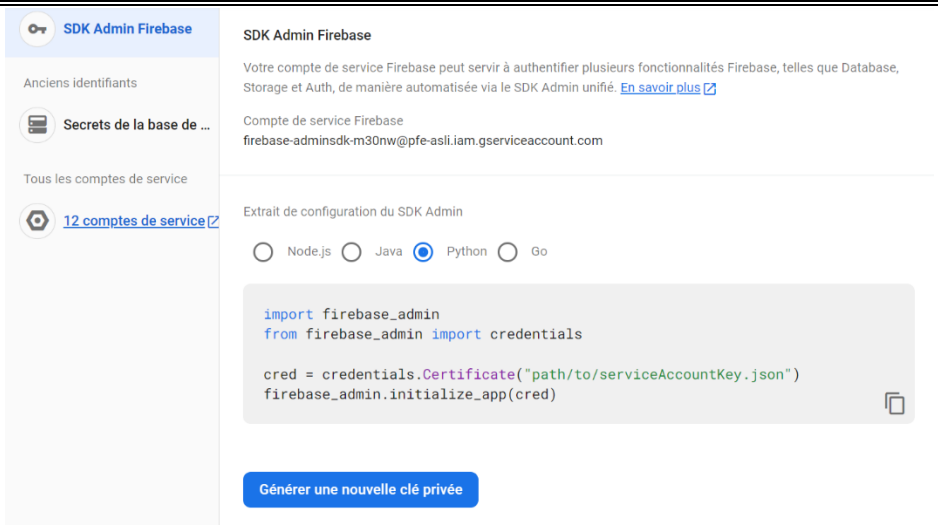


Figure III. 10 Configuration de firebase pour ajoute le modèle

Ce programme Python utilise des modules tels que time, control et numpy, ainsi que des bibliothèques Firebase, pour communiquer avec une base de données Firebase. Il configure l'authentification, définit les références de la base de données et initialise des variables globales pour stocker les données d'entrée et de sortie. Il génère une fonction de transfert, écrit et lit les valeurs dans la base de données, et exécute en arrière-plan un thread qui effectue périodiquement ces opérations. Le programme utilise des délais pour contrôler la fréquence de mise à jour des données.

III.4.2.5.2Simplification des équations

Pour notre projet, on considère une serre d'une surface de 1000 m^2 et d'une hauteur de 4 m.

La serre dispose d'un écran d'ombrage qui réduit l'énergie du rayonnement solaire incident de 60 %. La capacité maximale en eau du système de brumisation est de 26 g [H2O] $min^{-1}m^{-3}$.

Le taux de ventilation maximum correspond à 20 renouvellements d'air par heure.

Tableau 1 Paramètres de modèle de serre identifiés

Nom des paramètres	Unité	Valeurs
C_0	$minW°C^{-1}$	-324.67
UA	$W°C^{-1}$	29.81
t_v	Min	3.41
λ'	W	465
α'	$Ggm^{-3}min^{-1}W^{-1}$	0.0033
$1/V'$	$gm^{-3}min^{-1}$	13.3

Le volume d'air de mélange actif de la température et de l'humidité est donné par V_{TH}=0,65V1

Apres simplification des équations 1 et 2 et prend en considération les paramètres constants on obtient les équations suivantes :

$$\frac{dT_{in}}{dt} = \frac{1}{-324.67}\left[S(t) - (465 x Q_{\%fog})(t)\right] - \left(\frac{V_{R\%}(t)}{3.41} + \frac{29.81}{-324.67}\right).[T_{in}(t) - T_{out}(t)] \text{ .....(3)}$$

$$\frac{dH_{in}}{dt} = \frac{Q_{\%fog}(t)}{0.075} + 0.0033 x S(t) - \frac{V_{R\%}(t)}{3.41}.[H_{in}(t) - H_{out}(t)] \text{ .....(4)}$$

Pour simplifie notre modèle on considère :

S=60W , $Q_{\%fog} = \mathbf{26\%}$, $V_{R\%} = \mathbf{20\%}$

III.4.3 **Application web**

Pour créer notre application web, nous avons utilisé un modèle 3D (d'une serre) tel que présenté dans la figure III.11. Ce modèle 3D a été intégré à notre application pour fournir une représentation visuelle et interactive de certains éléments ou fonctionnalités. Nous avons commencé en ouvrant ce modèle à l'aide du logiciel Blender (voir l'annexe 4), afin d'apporter certaines modifications telles que l'ajout d'actionneurs et d'éléments complémentaires. Une fois les modifications effectuées, nous avons enregistré le modèle au format glb (GLTF Binary) afin de pouvoir l'importer dans notre application. Le format glb est largement utilisé pour les modèles 3D dans les applications web car il permet de stocker à la fois la géométrie 3D, les textures et les autres informations nécessaires à l'affichage du modèle de manière compacte et efficace. Grâce à cette étape d'enregistrement au format glb, nous avons pu intégrer le modèle modifié dans notre application web et le rendre disponible pour une utilisation interactive.

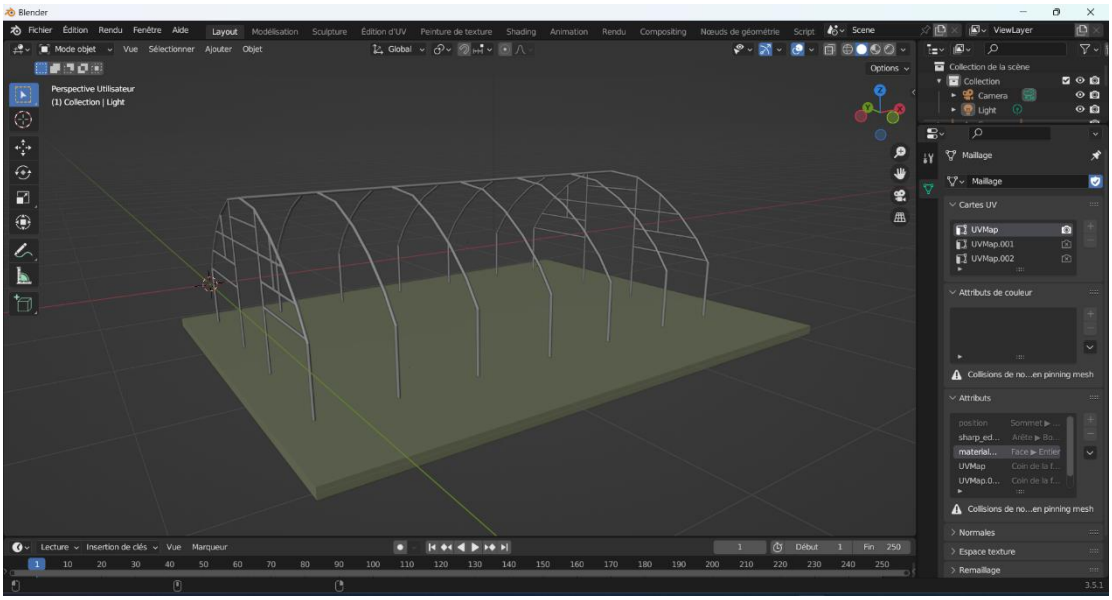


Figure III. 11 Modèle 3D d'une serre

Un projet React a été développé en utilisant les bibliothèques présentes sur la figure III

12



Figure III. 12 Bibliothèques utilisent sur le programme React

Le projet développé contient plusieurs sous-programmes, chacun ayant un rôle spécialisé.

- CmdButton.js : ce partie on crée un model générale d'un botton pour utiliser comme une bibliothèque
- Hotspot.js : La création d'un modèle générique de zones cliquables à utiliser comme une bibliothèque
- Historiques : l'organisation de la fenêtre d'historique qui prendre les valeurs depuis base de données (firebase) et affiche sous forme d'un tableau
- Visualisation : l'organisation de la fenêtre de visualisation qui contient l'importer de module 3D qui crée à base de logiciel Blender (voir l'annexe)
- Simulation : l'organisation de la fenêtre de simulation qui contient des botton pour active/désactive les actionneurs
- Login : l'organisation de la fenêtre enregistrement à notre application il prend les utilisateurs et les mots de passe depuis firebase authentication (figure III 7).
- firebase. la connexion avec la plateforme firebase pour partager les données entre aux
- App.js : définit le composant principal de l'application. Il affiche un logo, un texte et un lien vers le site web de React. Le rôle général du programme est de fournir une interface utilisateur avec des fonctionnalités de base.
- App.css : contient les styles CSS utilisés pour styliser une application ou une page web spécifique, en définissant les sélecteurs de classe et en spécifiant les styles visuels et le positionnement des éléments.

Une fois que le programme est terminé, nous avons exécuté les instructions suivantes dans le terminal de VS Code pour créer notre application :

- npm start
- npm run build
- cd build

Une fois l'exécution terminée, l'interface s'ouvre automatiquement dans le navigateur. Cependant, nous avons rencontré un problème où il était nécessaire d'exécuter le programme à

chaque fois que nous voulions accéder à notre application. Pour remédier à cela, nous avons utilisé la plateforme cloud de déploiement et d'hébergement d'applications web appelée Vercel.

Vercel est spécialement conçue pour faciliter le déploiement de projets React, Next.js et d'autres applications front-end. Nous avons commencé par pousser notre code vers un dépôt Git (GitHub, GitLab, BitBucket). Ensuite, nous avons importé notre projet React dans Vercel, ce qui a permis à la plateforme de configurer automatiquement les paramètres adaptés à notre déploiement (voir Figure III.13). Grâce à Vercel, nous avons obtenu un lien d'accès direct à notre application, éliminant ainsi le besoin d'exécuter le programme à chaque fois que nous souhaitions y accéder.

Maintenant, notre application est déployée à l'adresse suivante : 'https://pfe-digital-twin-2023.vercel.app/'. Nous pouvons ainsi y accéder depuis n'importe quel appareil en utilisant ce lien, rendant notre application facilement accessible et utilisable.

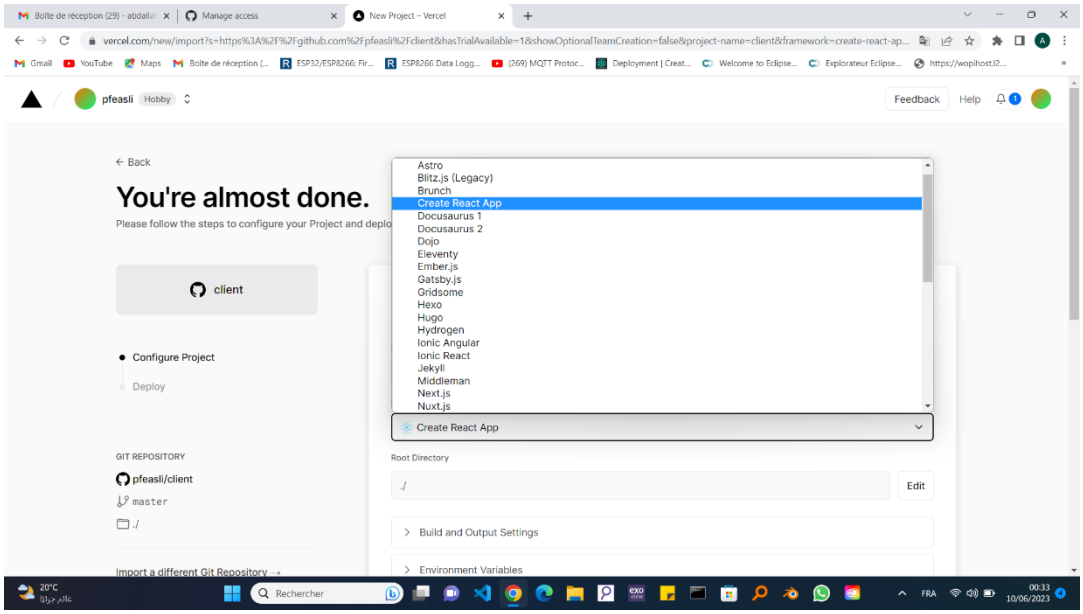


Figure III. 13 creation de projet React ur vercel

Une fois connecté au site, nous avons accès à la fenêtre de connexion, comme illustré sur la figure III.14. Nous saisissons l'adresse e-mail et le mot de passe dans les champs correspondants, puis appuyons sur le bouton "Se connecter".

III.4.3.1 **Interface d'authentification**

Cette interface permit l'authentification d'un utilisateur et ces droits d'accès en entrant un email et un mot de passe valide



Figure III. 14 Interface d'authentification Login

III.4.3.2 **Interface d'accueil**

L'interface d'accueil de notre application web développée est conçue avec un menu permettant d'accéder aux différentes fonctionnalités de gestion et de supervision de la serre, tel que présenté dans la figure III.14. Cette interface principale est subdivisée en trois interfaces secondaires distinctes : historiques, visualisation et simulation



Figure III. 15 Page principale d'application web

III.4.3.3 **Interface simulation**

L'interface de simulation, telle qu'illustrée dans la figure III.16, présente plusieurs éléments importants. Tout d'abord, elle est équipée de boutons de commande permettant de contrôler manuellement les actionneurs de la serre tels que les systèmes d'irrigation, de ventilation, d'éclairage, etc. Ces boutons donnent aux utilisateurs la possibilité d'activer ou de désactiver les actionneurs selon leurs besoins spécifiques.

En plus des boutons de commande, l'interface de simulation comprend un panneau de test dédié à la serre. Ce panneau permet aux utilisateurs d'effectuer des tests et des expérimentations spécifiques sur la serre. Par exemple, il leur permet de simuler des variations de température et d'humidité afin d'évaluer l'impact de ces changements sur les plantes ou les cultures. Cela offre aux utilisateurs la possibilité de conduire des expériences contrôlées pour mieux comprendre les réactions de la serre dans des conditions spécifiques.

Enfin, l'interface de simulation propose un bouton permettant de basculer entre les modes de commande manuel et automatique. Le mode manuel permet aux utilisateurs de contrôler directement les actionneurs de la serre, tandis que le mode automatique permet à la serre de fonctionner selon un programme Arduino préétabli. Cette fonctionnalité offre une flexibilité aux utilisateurs en leur permettant de choisir le mode de fonctionnement qui convient le mieux à leurs besoins et à leurs expérimentations. Ils peuvent opter pour le contrôle manuel lorsqu'ils souhaitent avoir un contrôle précis sur les actionneurs, ou choisir le mode automatique pour laisser la serre fonctionner selon le programme prédéfini sans intervention directe.

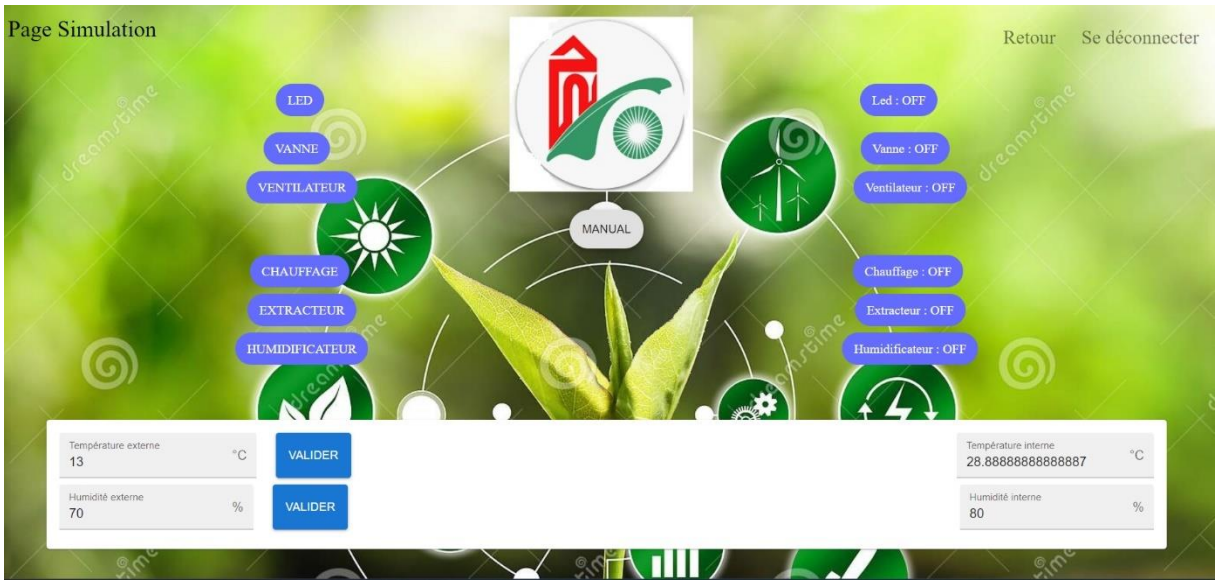


Figure III. 16 Interface Simulation

III.4.3.4 **Interface de visualisation**

Cette interface offre une fonctionnalité de visualisation en temps réel de l'état des actionneurs et des valeurs des capteurs, comme illustré dans la figure III.17. Les utilisateurs peuvent observer instantanément les informations actualisées concernant l'état des actionneurs tels que les systèmes d'irrigation, de ventilation, d'éclairage, etc. Cela leur permet de savoir si les actionneurs sont activés ou désactivés et de prendre des mesures en conséquence.

De plus, cette interface affiche en temps réel les valeurs des capteurs tels que la température, l'humidité, le niveau de CO2, et d'autres paramètres environnementaux. Les

utilisateurs peuvent voir ces valeurs en direct, ce qui leur permet de surveiller activement les conditions environnementales à l'intérieur de la serre. Ils peuvent réagir rapidement aux variations des paramètres et prendre des décisions pour maintenir un environnement optimal pour les plantes cultivées.

La visualisation en temps réel des actionneurs et des valeurs des capteurs permet aux utilisateurs de garder un contrôle total sur la serre, de réagir efficacement aux changements environnementaux et de prendre des mesures pour maintenir des conditions idéales. Cela contribue à assurer une gestion et une supervision efficaces de la serre, favorisant ainsi la croissance et le développement des plantes dans un environnement optimal.

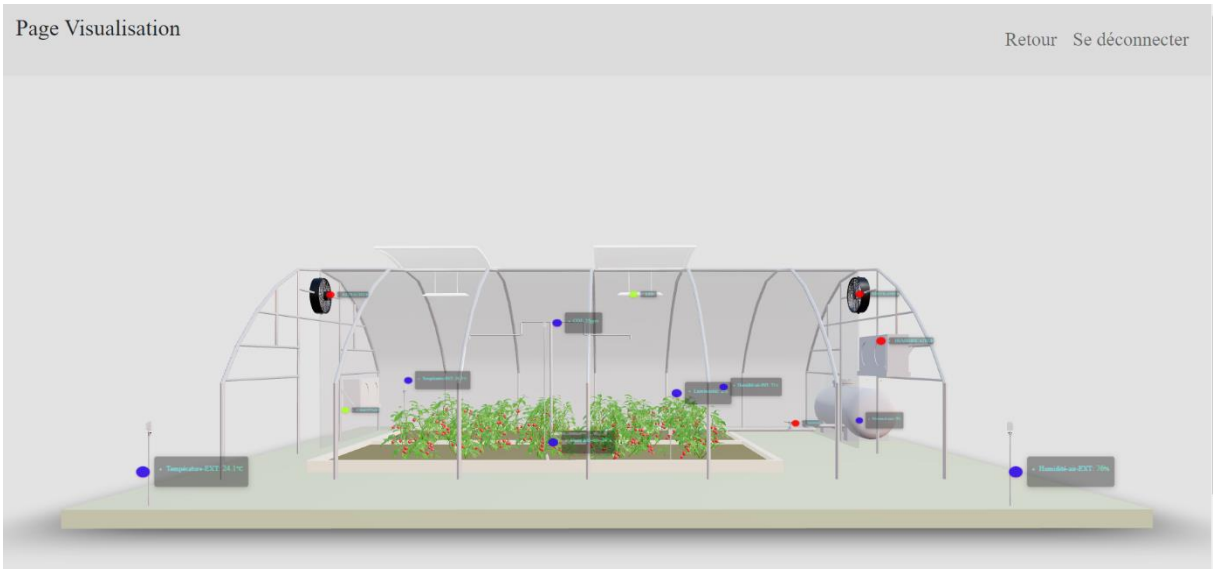


Figure III. 17 Interface de visualisation

III.4.3.5 **Interface d'historique**

Cette interface a été spécifiquement conçue pour la visualisation de l'historique des capteurs dans notre serre, comme présenté dans les figures III.18 et III.19. Elle offre aux utilisateurs la possibilité d'accéder aux données passées des capteurs, telles que les températures, l'humidité, la luminosité, etc. Cela leur permet de suivre les variations et les tendances au fil du temps.

En utilisant cette interface, les utilisateurs peuvent analyser l'évolution des conditions environnementales de la serre sur une période donnée. Ils peuvent observer les fluctuations de température, les niveaux d'humidité, les variations de luminosité, et d'autres paramètres importants. Grâce à cette visualisation de l'historique des capteurs, les utilisateurs peuvent obtenir une vision globale de la performance de la serre sur une période prolongée.

Cela facilite une meilleure gestion de la serre et une prise de décisions éclairées. Par exemple, en analysant les données historiques, les utilisateurs peuvent identifier des schémas ou des tendances récurrentes, ce qui peut les aider à ajuster les réglages des actionneurs ou à mettre en place des stratégies de gestion plus efficaces. Ils peuvent également comparer les données actuelles avec les données historiques pour évaluer les performances de la serre et prendre des décisions en conséquence.

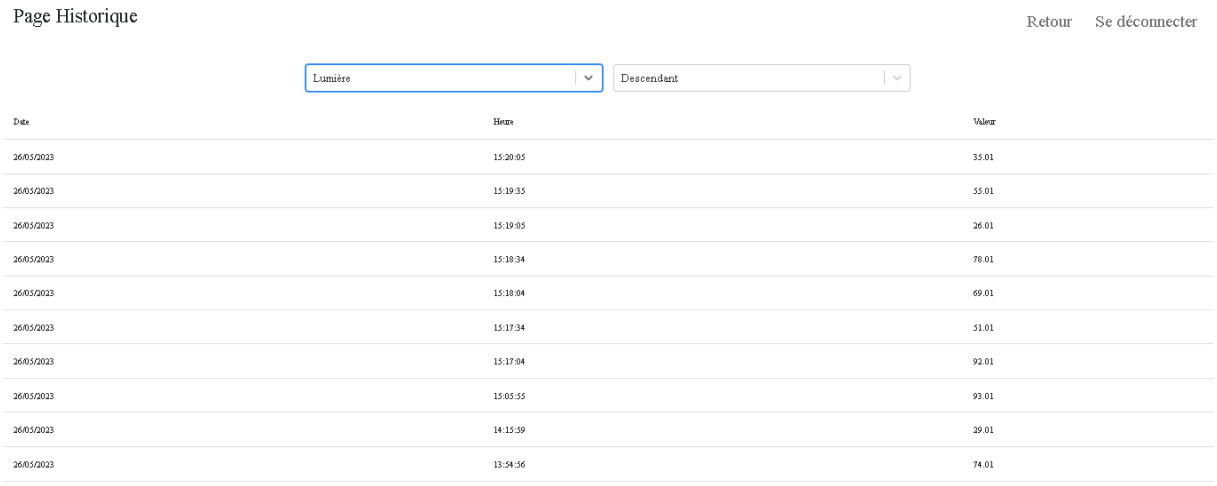


Figure III. 18 Historique des valeurs de lumière sur l'application

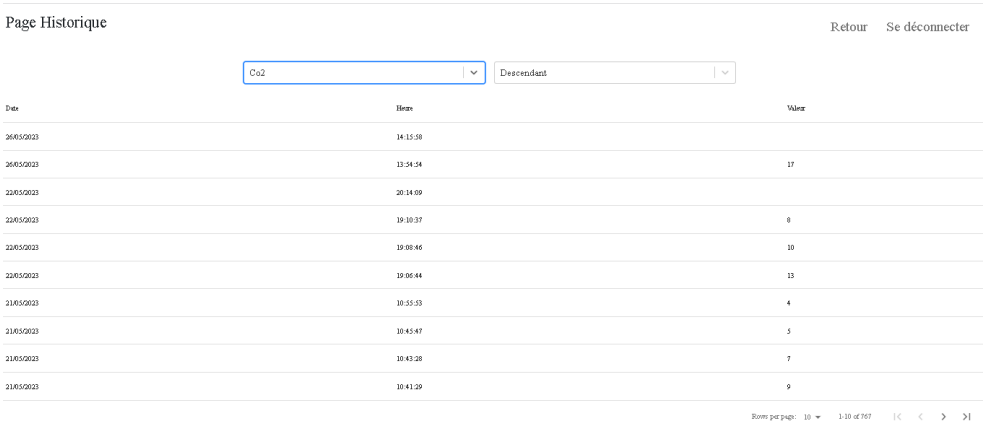


Figure III. 19 Historique des valeurs de CO_2 sur l'application

III.5 **Résultats de test**

Un prototype a été développé, tel que présenté dans la figure III.20.

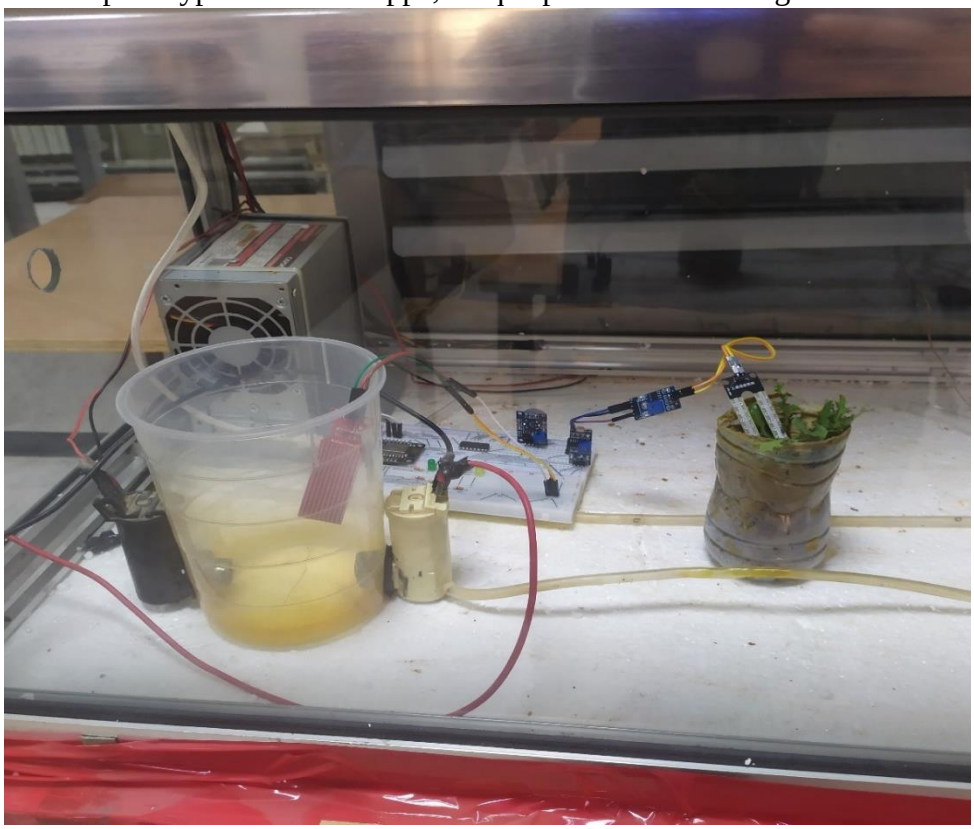


Figure III. 20 Circuit de projet

Dans cette partie, nous effectuons une vérification de notre travail pour nous assurer du bon fonctionnement de l'application et de la connexion pratique. Nous apportons également une modification en remplaçant les actionneurs par des LED, ce qui simplifie la visualisation de l'état de la serre.

La figure III.21 est présentée pour illustrer la signification de chaque LED, accompagnée d'un résumé. Cette figure fournit une référence visuelle pour comprendre le statut ou l'état représenté par chaque LED. Cela permet aux utilisateurs de savoir rapidement et facilement ce que chaque LED indique, que ce soit l'état de fonctionnement de la serre, par exemple, l'allumage ou l'extinction d'une LED correspondant à un actionneur spécifique.

En effectuant cette vérification, nous nous assurons que l'application fonctionne correctement avec les LED en tant qu'indicateurs d'état. Cela garantit une utilisation efficace de l'application en offrant aux utilisateurs une compréhension claire de l'état de la serre grâce aux LED correspondantes. Ainsi, ils peuvent réagir rapidement aux changements et prendre les mesures appropriées pour maintenir un environnement optimal dans la serre.

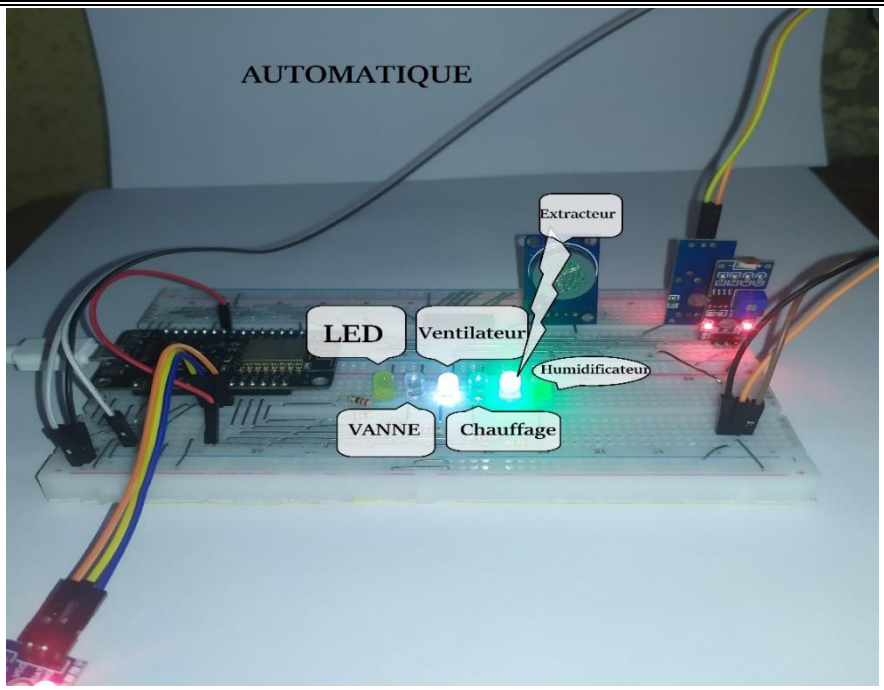


Figure III. 21 Equivalent de LED en réel

On effectue une vérification des valeurs à afficher sur les trois couches de notre projet : la couche physique (série moniteur d'Arduino IDE), la couche « jumeau numérique » (Firebase) et l'application web. Cela nous permet de garantir la cohérence des données affichées sur ces différentes couches.

La couche physique, représentée par le moniteur série de l'Arduino IDE, affiche les valeurs directement issues des capteurs et actionneurs physiques de la serre. Ces valeurs sont transmises via la connexion série et servent de référence pour les mesures réelles.

La couche « jumeau numérique », mise en place avec Firebase, représente une copie virtuelle de l'état de la serre. Les valeurs des capteurs et actionneurs sont mises à jour en temps réel dans la base de données Firebase, reflétant ainsi l'état actuel de la serre.

Enfin, l'application web récupère les données de la couche jumeau numérique et les affiche à l'utilisateur de manière conviviale. Les utilisateurs peuvent ainsi visualiser les valeurs des capteurs et actionneurs sur une interface graphique interactive.

En vérifiant les valeurs affichées sur ces trois couches, nous nous assurons de leur cohérence. Cela signifie que les valeurs affichées sur l'application web correspondent aux valeurs réelles des capteurs et actionneurs de la serre, telles qu'affichées dans le moniteur série de l'Arduino IDE et mises à jour dans Firebase.

Cette vérification est essentielle pour s'assurer que les utilisateurs de l'application web disposent d'informations précises et à jour sur l'état de la serre. Elle garantit une supervision et

une gestion efficaces de la serre, en permettant aux utilisateurs de prendre des décisions éclairées basées sur des données fiables. Les figures fournies illustrent visuellement cette vérification et permettent de constater la cohérence des valeurs affichées sur les différentes couches.

- La figure III.22 présente les valeurs des grandeurs physiques à afficher dans l'interface. Ces grandeurs physiques correspondent aux mesures et aux données collectées par les capteurs de la serre.

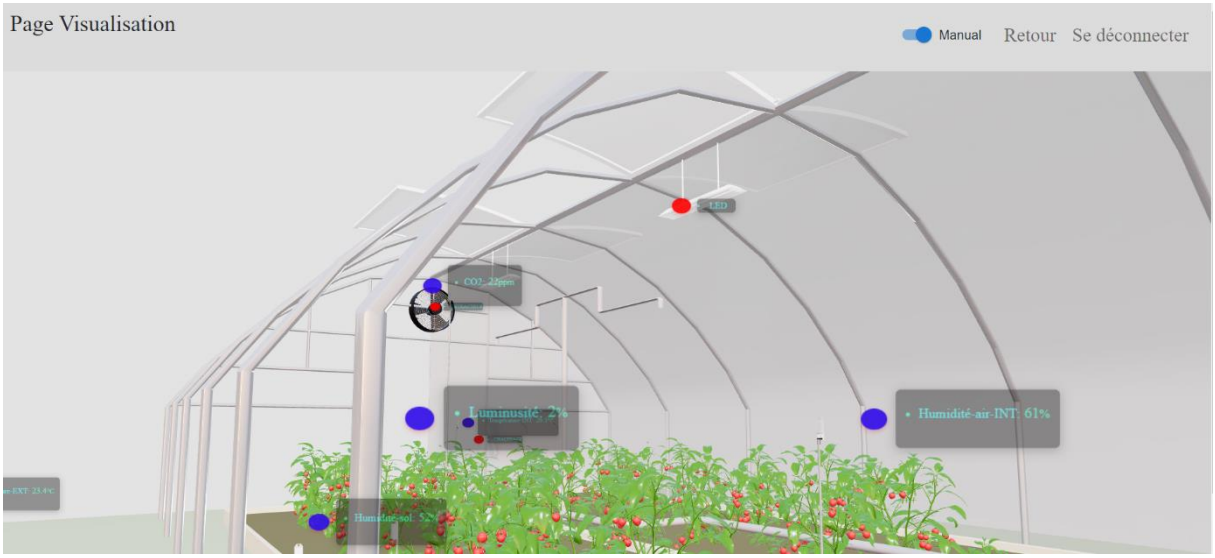


Figure III. 22 Valeurs des capteurs sur l'interface

- La figure III.23 présente les valeurs des grandeurs physiques reçues par Firebase (Realtime Database). Ces grandeurs physiques correspondent aux données mises à jour en temps réel dans la base de données Firebase, provenant des capteurs de la serre

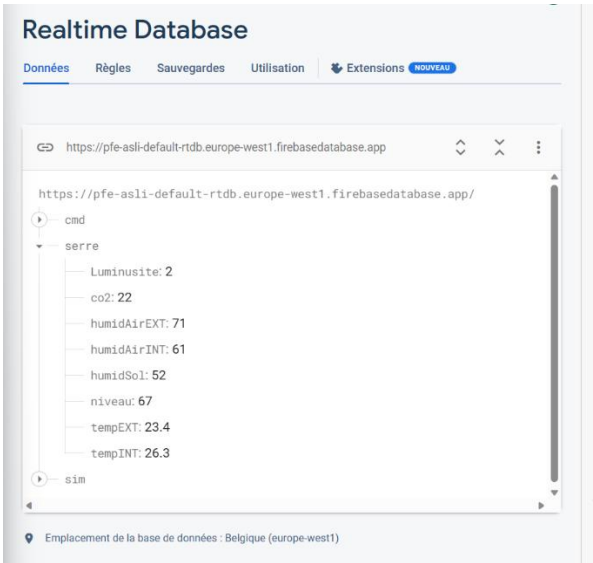


Figure III. 23 Valeur des capteurs sur firebase

- La figure III.24 présente les valeurs réelles des grandeurs physiques affichées par l'Arduino IDE (moniteur série). Ces valeurs correspondent directement aux mesures captées par les capteurs physiques de la serre et transmises à l'Arduino.

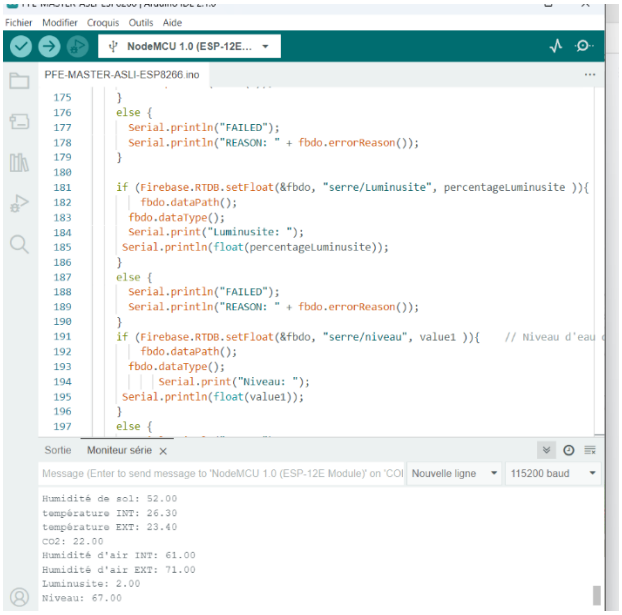


Figure III. 24 Valeur des capteurs sur série moniteur

Dans notre système, les valeurs des grandeurs physiques sont synchronisées en temps réel entre l'interface de visualisation, la base de données Firebase et le système réel. Toute modification apportée à ces valeurs sera également reflétée instantanément sur les différentes couches de l'application.

Pour vérifier la justesse de cette relation, nous avons effectué quelques exemples de tests.

- Exemple 1 : tous les actionneurs désactive

Dans l'exemple 1, nous effectuons une vérification en désactivant tous les actionneurs de notre application. La figure III.25 illustre l'état des actionneurs dans notre interface, où tous les actionneurs sont affichés comme étant à l'état "OFF". Cela signifie que visuellement, dans l'interface de l'application, chaque actionneur est représenté comme étant désactivé, indiquant qu'aucune action n'est en cours pour ces dispositifs. Cette visualisation claire et précise permet aux utilisateurs de vérifier rapidement l'état des actionneurs et de confirmer que tous les actionneurs sont effectivement désactivés. Cela démontre la cohérence et la précision de notre

système dans la synchronisation de l'état des actionneurs entre l'application et la réalité.



Figure III. 25 Etat des actionneurs sur la page de commande

La figure III.26 illustre l'état des actionneurs affiché dans le moniteur série, où tous les actionneurs sont indiqués comme étant à l'état 0.

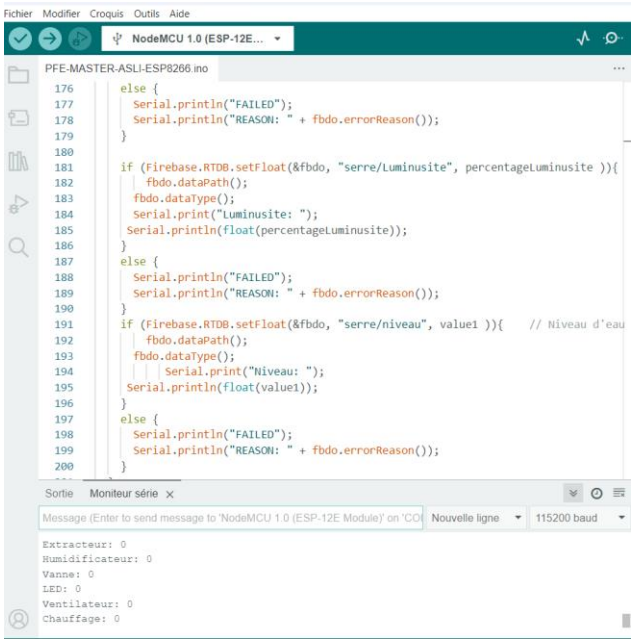


Figure III. 26 Etat des actionneurs sur le serial moniteur

Dans la figure III.27, on peut observer l'état des actionneurs dans Firebase, où tous les actionneurs sont affichés avec une valeur d'état égale à 0. Cette représentation dans Firebase indique que tous les actionneurs sont actuellement dans un état désactivé, car l'état 0 est associé à l'état "OFF" ou "désactivé". Cette synchronisation entre l'interface de l'application, le moniteur série et Firebase garantit que l'état des actionneurs est correctement propagé et reflété dans toutes les couches du système.

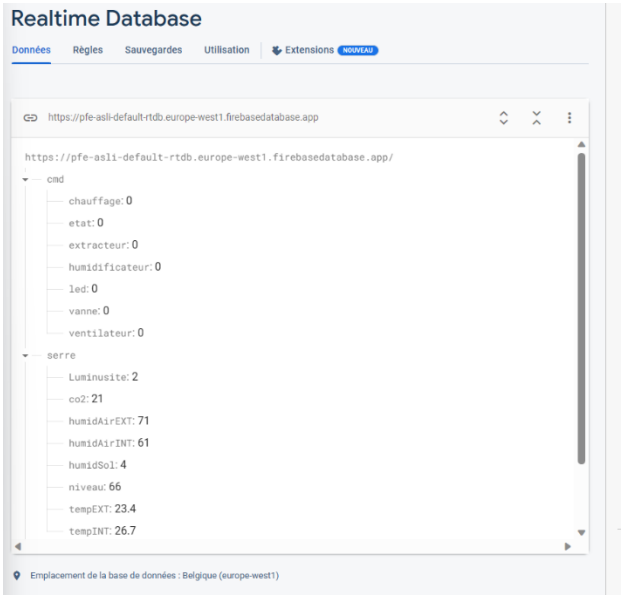


Figure III. 27 Etat des actionneurs sur firebase

Dans la figure III.28, l'état des actionneurs est présenté dans l'application, où les actionneurs sont représentés par une LED rouge.

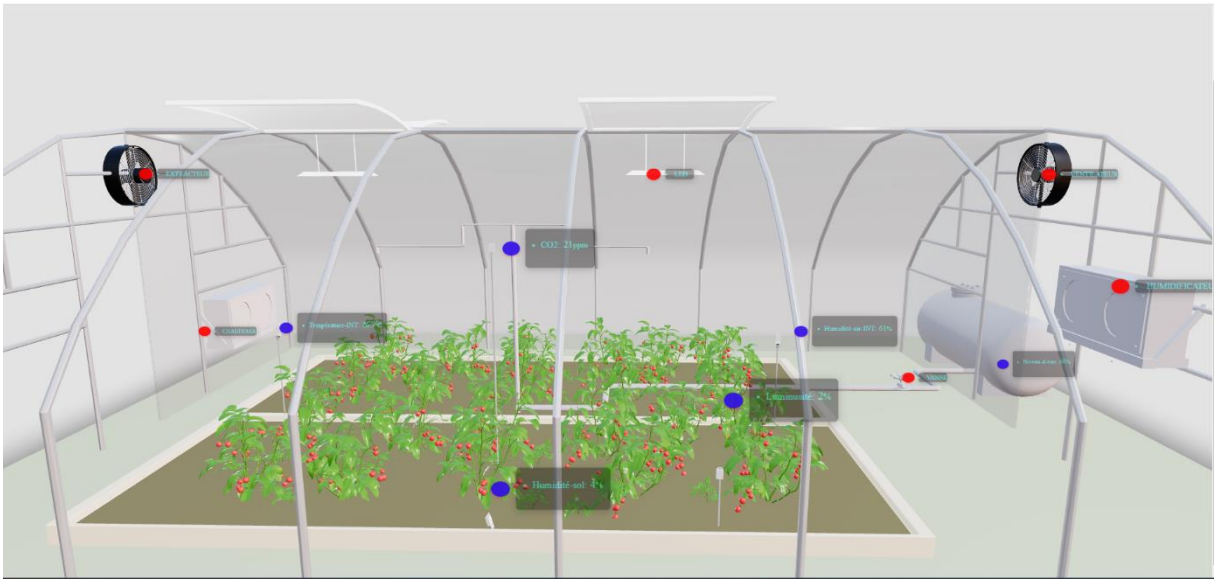


Figure III. 28 Etat des actionneurs sur l'interface

➢ Exemple 2 la LED et active et l'autre actionneur sont désactivés

Dans l'exemple 2, nous pouvons observer l'état des actionneurs dans les différentes couches de notre système. Voici une description des figures correspondantes :

- La figure III.29 présente l'état des actionneurs dans l'application. Dans cette figure, tous les actionneurs sont à l'état "OFF" sauf les LED qui sont à l'état "ON". Cela

peut être représenté visuellement par des boutons ou des indicateurs d'état dans l'interface de l'application.

- La figure III.30 présente l'état des actionneurs dans Firebase. Dans cette figure, tous les actionneurs sont à l'état 0 (désactivés) sauf les LED qui sont à l'état 1 (activées). Cette représentation dans Firebase assure la synchronisation des états des actionneurs entre l'interface de l'application et la base de données.
- La figure III.31 présente l'état des actionneurs dans le moniteur série. Dans cette figure, tous les actionneurs sont à l'état 0 (désactivés) sauf les LED qui sont à l'état 1 (activées). Cette visualisation dans le moniteur série permet de vérifier que l'état des actionneurs est correctement propagé depuis l'interface de l'application.
- La figure III.32 présente l'état des actionneurs dans l'interface de l'application. Dans cette figure, tous les actionneurs sont représentés en rouge (désactivés) sauf les LED qui sont représentées en vert (activées). Cette représentation visuelle dans l'interface permet aux utilisateurs de voir facilement l'état de chaque actionneur.

Ces figures démontrent que l'état des actionneurs est synchronisé sur les trois couches de l'application : l'interface de visualisation, la base de données Firebase et le système réel. Cela garantit que toute modification apportée à l'état des actionneurs dans l'interface de l'application sera reflétée instantanément dans les autres couches, assurant ainsi une cohérence et une synchronisation appropriées.



Figure III. 29 Etat des actionneurs sur la page de commande 2

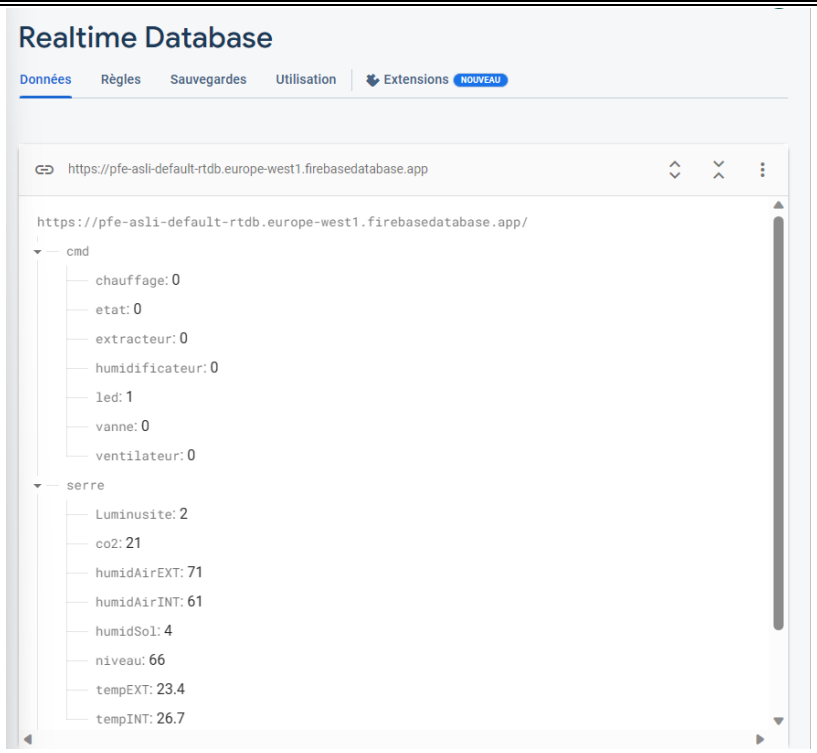


Figure III. 30 Etat des actionneurs sur firebase

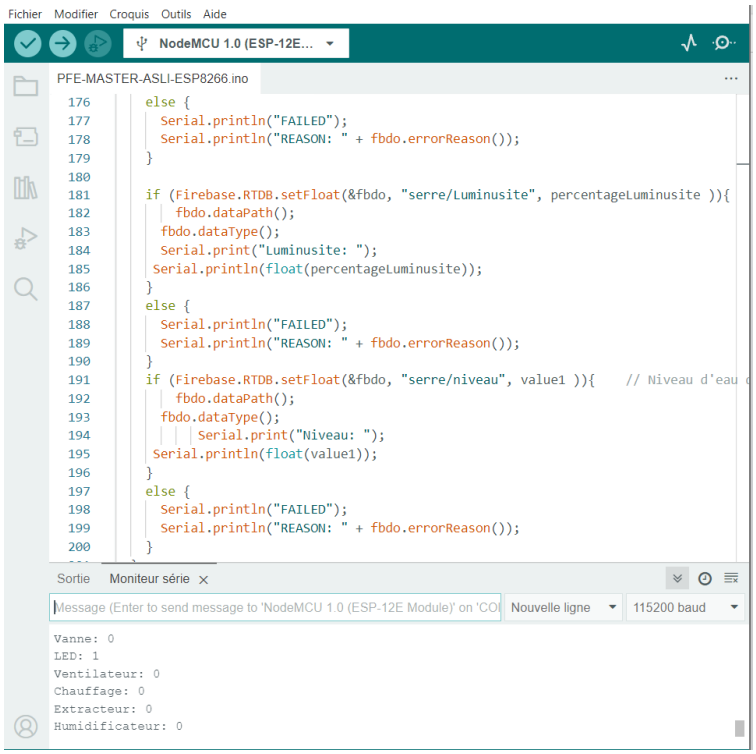


Figure III. 31 Etat des actionneurs sur le serial moniteur 2



Figure III. 32 Etat des actionneurs sur l'interface 2

Pour valider le modèle développé, nous avons tracé deux graphes qui illustrent la variation de la température réelle par rapport à la température modélisé, ainsi que l'humidité réelle par rapport à l'humidité modélisé, en fonction du temps. Ces graphes permettront de comparer les prédictions du modèle aux mesures réelles et d'évaluer la précision et l'adéquation du modèle.

Figure III.33 illustre une comparaison de la température réelle et de la température modélisé en fonction du temps.

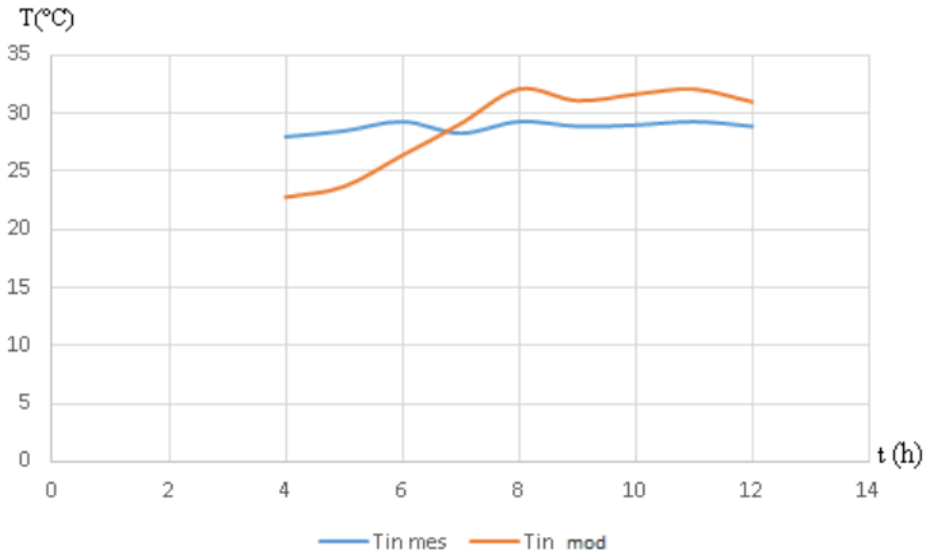


Figure III. 33 Comparaison entre la température réelle et de la température modélisé

On remarque que la température prédite est presque similaire à la température mesurée, avec quelques erreurs.

Figure III.34 illustre une comparaison de l'humidité réelle et de l'humidité modélisé en fonction du temps.

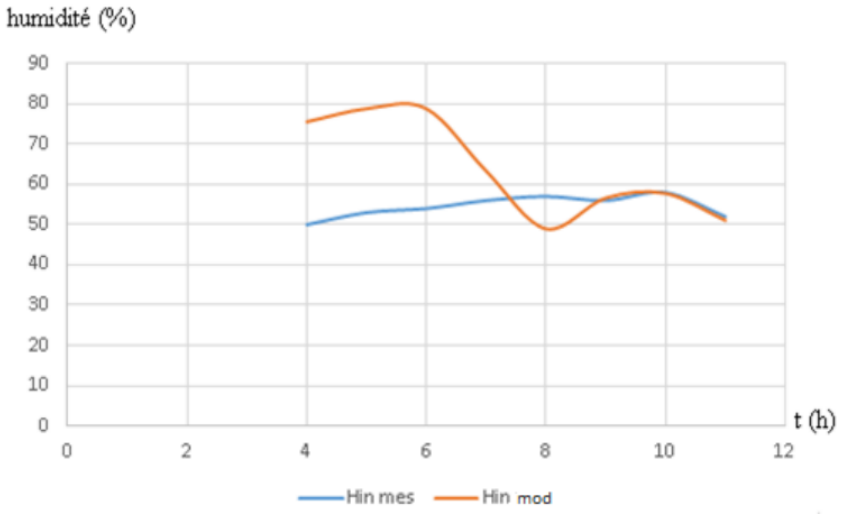


Figure III. 34 Comparaison entre l'humidité réelle et de l'humidité modélisé

III.6 **Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons effectué la vérification pratique de notre projet, en mettant l'accent sur la cohérence des données et des commandes entre les différentes couches de notre jumeau numérique. Nous avons constaté que les valeurs des grandeurs physiques sont synchronisées et cohérentes sur l'interface de visualisation, dans la base de données et dans le système réel. Ainsi, toute modification apportée à ces valeurs est immédiatement reflétée sur les autres couches, assurant ainsi une visualisation précise en temps réel.

De plus, nous avons vérifié que la commande à distance à partir de l'application fonctionne correctement, ce qui nous permet de contrôler les actionneurs du système réel. Nous avons confirmé que les commandes émises depuis l'interface de l'application sont bien reçues et exécutées par les actionneurs, ce qui garantit un contrôle précis et fiable du système.

En résumé, nous avons établi une connexion fiable entre les différentes couches de notre jumeau numérique, assurant une synchronisation précise des données et des commandes. Cette cohérence nous permet d'utiliser efficacement notre application, en offrant une visualisation en temps réel des grandeurs physiques et en permettant un contrôle à distance précis des actionneurs.

Conclusion générale

Conclusion générale

En conclusion, notre projet a présenté le développement d'un jumeau numérique pour la gestion intelligente d'une serre agricole. Les objectifs principaux étaient d'élaborer un système de surveillance et de contrôle des conditions environnementales de la serre, d'optimiser l'utilisation des ressources et d'accroître la productivité des cultures.

Dans cette étude, nous avons développé un jumeau numérique pour les serres agricoles basé sur la plateforme Firebase IoT. Nous avons connecté ce dernier à notre serre en utilisant des capteurs tels que le DHT11, le MQ-7 et le capteur d'humidité du sol, à l'aide de la carte électronique ESP8266 et du mode de communication WebSocket. Ensuite, nous avons développé notre application web qui facilite la visualisation et le contrôle des données.

À travers notre système, nous pouvons réaliser les fonctionnalités suivantes :

- Collection des données : Les données sont collectées à l'aide de la carte ESP8266, où les informations provenant des capteurs sont recueillies et envoyées à notre jumeau numérique via une connexion WebSocket.
- Stockage des données : Les données collectées sont stockées de manière sécurisée et accessible dans le Cloud Firestore.
- Analyse des données : Les données sont analysées à l'aide de Firebase.
- Modèle prédictif : Un modèle prédictif est utilisé pour la surveillance et la gestion des conditions environnementales à l'intérieur de la serre.
- Application web : Cette fonctionnalité nous permet de visualiser en temps réel les données des capteurs et l'état des actionneurs, ainsi que l'historique des données stockées. Elle nous permet également de commander à distance les actionneurs à travers notre application.

Au début de notre projet, nous avons rencontré plusieurs problèmes, tels que la création d'un compte étudiant sur la plateforme Azure et le développement d'un jumeau numérique sur la plateforme Ditto. C'est pourquoi nous avons opté pour l'utilisation de Firebase.

En ce qui concerne les suggestions pour améliorer un jumeau numérique d'une serre agricole, nous recommandons les mesures suivantes :

- Évolutivité et extensibilité : Concevez le jumeau numérique de manière à ce qu'il puisse être facilement mis à jour et étendu à mesure que de nouvelles fonctionnalités ou de nouveaux capteurs sont ajoutés. Cela garantira que le système reste flexible et adapté aux besoins futurs.
- Validation et calibration : Veillez à valider et à calibrer régulièrement le jumeau numérique en comparant les prévisions avec les données réelles. Cela permettra d'améliorer la précision et la fiabilité des résultats.
- Utilisation de l'intelligence artificielle et de l'apprentissage automatique : Exploitez les techniques d'intelligence artificielle et d'apprentissage automatique pour analyser les données collectées, détecter les modèles et les anomalies, et améliorer les prévisions. Les algorithmes d'apprentissage automatique peuvent aider à optimiser les paramètres de la serre et à prendre des décisions basées sur les données historiques.

En mettant en œuvre ces suggestions, nous pouvons améliorer les performances et l'efficacité de notre jumeau numérique pour une serre agricole.

Référence bibliographique

Référence bibliographique

[1] www.inrs.fr/dms/ficheTox/FicheFicheTox/FICHETOX_238-1/FicheTox_238.pdf

[2] F.DIDI, « Optimisation de la gestion du microclimat de la serre par l'introduction de l'intelligence artificielle », Thèse de Doctorat Energies Renouvelables,UNIVERSITE ABOU-BEKR BELKAID de Tlemcen, 2018.

[3] « L'éclairage artificiel ». [En ligne]. Disponible sur : http://www.hortere.fr/eclairage/ [Accessed:18-juin-2023].

[4] ZERAIB-ALA-EDDINE, « Une approche IoT pour la mise en œuvre des serres intelligentes connectées ». Mémoire de fin d'étude Master, université de biskra, 2018.

[5]. Liu, Y.; Ma, X.; Shu, L.; Hancke, G.P.; Abu-Mahfouz, A.M. From Industry 4.0 to Agriculture 4.0: Current Status, Enabling Technologies, and Research Challenges. *IEEE Trans. Ind. Inform.* **2020**.

[6] Jayaraman, Prem, et al. "Internet of things platform for smart farming: Experiences and lessons learnt." Sensors 16.11 (2016): 1884.

[7] Philippe Zwaenepoel & Jean-Michel Le Bars (1977), L'agriculture de précision ; Ingénieries EAT n o 12, décembre 1997, p. 67 à 79

[8] http ://www.omafra.gov.on.ca/french/livestock/vet/disease_pre.html . [Accessed:18-juin-2023].

[9]. Villa-Henriksen, A.; Edwards, G.T.C.; Pesonen, L.A.; Green, O.; Sørensen, C.A.G. Internet of Things in arable farming: Implementation, applications, challenges and potential. *Biosyst. Eng.* **2020**, *191*, 60–84.

[10]. Erich-Christian Oerke, Roland Gerhards, Gunter Menz, Richard A. Sikora "Precision Crop Protection - the Challenge and Use of Heterogeneity" Springer Dordrecht 2011.

[11]. Oliveira, Luiz F. P., António P. Moreira, and Manuel F. Silva. "Advances in Agriculture Robotics: A State-of-the-Art Review and Challenges Ahead" *Robotics* 10, vol 52.no. 2. 2021. https://doi.org/10.3390/robotics10020052

[12] Muzafarov Farruh, Abdimurod Eshmuradov, "Wireless sensor network based monitoring system for precision agriculture" TELKOMNIKA, Vol.17, No.3, June 2019, pp.1071~1080.

[13] Baci Wassime, Gestion automatique des serres agricoles dans une ferme, Mémoire de master, Université Mohamed Khider, Biskra, 2019.

[14] Soumyalatha, Shruti G Hegde, ‘’Study of IoT: Understanding IoT Architecture, Applications, Issues and Challenges ‘’, International Journal of Advanced Networking & Applications (IJANA)pp: 472- 482, 2019.

[15] . Kritzinger W, Karner M, Traar G, Henjes J, Sihn W (2018) Digital Twin in manu facturing: A categorical literature review and classification. IFAC-Pap 51:1016–1022

[16] Beyond thedigitaltwin–makinganalytics https://www.iosb.fraunhofer.de/servlet/is/81714/ . [Accessed:18-juin-2023].

[17] E. Glassgen et D. Stargel, "Le paradigme du jumeau numérique pour les futurs véhicules de la NASA et de l'US Air Force", dans Actes de la 52e conférence AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials, Reston, VA, États-Unis , 2011, p. 1-10, doi : 10.2514/6.2011-1818

[18] E. Negri, L. Fumagalli et M. Macchi, "Un examen des rôles du jumeau numérique dans les systèmes de production basés sur CPS", Procedia Manufacturing, vol. 11, p. 93, 2017.

[19] Reid, Jack B., and Donna H. Rhodes. "Digital system models: An investigation of the nontechnical challenges and research needs." Conference on Systems Engineering Research. 2016.

[20] . The Mysterious History of Digital Twin Technology and Who Created It. In: Chall. Advis. https://www.challenge.org/insights/digital-twin-history/ . [Accessed:18-juin-2023].

[21] . West T, Pyster A (2015) Untangling the Digital Thread: The Challenge and Promise of Model-Based Engineering in Defense Acquisition. INSIGHT 18:45–55

[22]N. JULIEN and E. MARTIN, Le jumeau numérique - De l’intelligence artificielle à l’industrie agile, Dunod. 2020.

[23] F. Henquet. (2021). Digital Twin. Jobat Skills Campus. Retrieved from https://online.jobsatskillscampus.be/courses/course-v1:Jobsaskills+CS02+2021/about.

[24] M. Dr. Grieves, "Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication," White Paper, March 2014. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/275211047_Digital_Twin_Manufacturing_Excellence_through_Virtual_Factory_Replication.

[25] https://netmoregroup.com/digital-twin-explained/ [Accessed:18-juin-2023].

[26] A. Parrott and W. Lane, “Industry 4.0 and the Digital Twin,” Deloitte University Press, May-2017. [Online]. Available: https://dupress.deloitte.com/dup-us-en/focus/industry 4 0/digital-twin-technology-smart-factory.html . [Accessed:18-juin-2023].

[27] https://www.mecalux.fr/blog/digital-twin . [Accessed:18-juin-2023].

[28] Grieves, M., "Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication", 2014.

[29] Maninder Jeet Kaur, Wade P. Mishra & Piyush Maheshwari "The Convergence of Digital Twin, IoT, and Machine Learning: Transforming Data into Action", Springer, Cham 2018.

[30] C. Shi, et al., "Digital Twin in Smart Manufacturing: A Survey," Journal of Manufacturing Science and Engineering, vol. 140, no. 6, p. 061010, 2018.

[31] Tao, F., Cheng, J., Qi, Q. et al. Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data. Int J Adv Manuf Technol 94, 3563–3576 (2019).

[32] Yujie Wang, Xu Kang, Zonghai Chen, "A survey of Digital Twin techniques in smart manufacturing and management of energy applications", Green Energy and Intelligent Transportation ,Volume 1, Issue 2, September 2022

[33]https://docs.aws.amazon.com/iot-twinmaker/latest/guide/what-is-twinmaker.html [Accessed:18-juin-2023].

[34]https://azure.microsoft.com/fr-fr/products/digital-twins/#layout-container-uida34c [Accessed:18-juin-2023].

[35] https://www.eclipse.org/ditto/intro-overview.html [Accessed:18-juin-2023].

[36]https://altair.com/smartworks?utm_campaign=corp_2021_Smart+Product+Development&utm_source=eguide&utm_medium=pdf&utm_content=eguide-guide-to-smart-product-development [Accessed:18-juin-2023].

[37]. Pasgianos, G.D.; Arvanitis, K.G.; Polycarpou, P.; Sigrimis, N. A nonlinear feedback technique for greenhouse environmental control. *Comput. Electron. Agric.* **2003**, *40*, 153–177

[38]. Albright, L.D.; Gates, R.S.; Arvanitis, K.G.; Drysdale, A.E. Environmental control for plants on earth and in space. *IEEE Control Syst. Mag.* **2001**, *21*, 28–47.

[39]. Ghosal, M.K.; Tiwari, G.N.; Srivastava, N.S.L. Modeling and experimental validation of a greenhouse with evaporative cooling by moving water film over external shade cloth. *Energ. Bldg.* **2003**, *35*, 843–850.

[40]. Nielsen, B.; Madsen, H. Identification of a linear continuous time stochastic model of the heat dynamic of a greenhouse. *J. Agr. Eng. Res.* **1998**, *71*, 249–256.

[41]. Fourati, F.; Chtourou, M. A greenhouse control with feed-forward and recurrent neural networks. *Simul. Model Pract. Theory* **2007**, *15*, 1016–1028.

[42]. He, F.; Ma, C.; Modeling greenhouse air humidity by means of artificial neural network and principal component analysis. *Comput. Electron. Agric.* **2010**, *71S*, S19–S23.

[43]. Trejo-Perea, M.; Herrera-Ruiz, G.; Rios-Moreno, J.; Miranda, R. C.; Rivas-Araiza, E. Greenhouse energy consumption prediction using neural networks models. *Int. J. Agric. Biol.* **2009**, *11*, 1–6.

[44]. Cunha, J.B. Greenhouse climate models: An overview. In *Proceedings of EFITA 2003 Conference*, Debrecen, Hungary, 5–9 July 2003; pp. 823–829.

[45] I. Fette, "The WebSocket Protocol," December 2011. [Online]. Available: https://tools.ietf.org/html/rfc6455.

[46] LUBBERS, Peter et GRECO, Frank. HTML5 websocket: a quantum leap in scalability for the web (2010). URL http://www. websocket. org/quantum. html, 2020.

[47] "WebSocket: Browser APIs and Protocols, Chapter 17," [Online]. Available: https://hpbn.co/websocket/. [Accessed: 13-June-2023].

Annexe

Annexe 1

Firebase

1 Définition

Firebase est une plateforme de développement d'applications mobiles et web proposée par Google. Elle offre une gamme complète d'outils et de services pour faciliter la création, le déploiement et la gestion d'applications de haute qualité.

2 Les Technologies de Développement Firebase

Les Technologies de Développement Firebase ont été spécialement conçues pour améliorer votre expérience de développement d'applications. Elles sont présentées dans la partie gauche du diagramme ci-dessus.

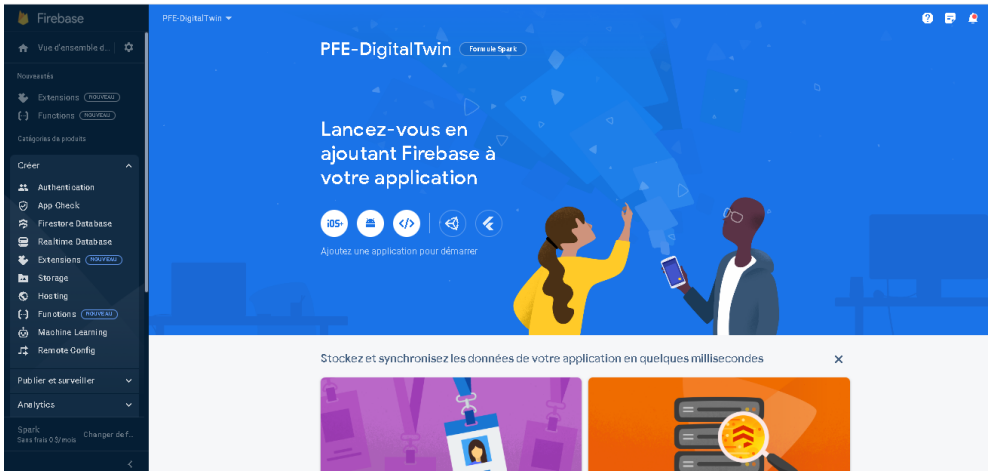


Figure 1 plateforme firebase

2.1 Authentification Firebase

Lorsque votre application a besoin de connaître l'identité de l'utilisateur afin de lui fournir des données spécifiques, une méthode d'authentification sécurisée est nécessaire. Mettre en place et maintenir une infrastructure d'authentification est une tâche difficile et coûteuse. Du point de vue de l'utilisateur, fournir des informations d'identification et des données personnelles à une application peut également être un obstacle à l'expérience utilisateur, pouvant même le dissuader de l'utiliser. Ainsi, les applications qui permettent aux utilisateurs de s'identifier avec des informations d'identification connues, telles que celles fournies par Google, Facebook et Twitter, deviennent de plus en plus populaires. Avec ces problématiques et tendances à l'esprit, Firebase Authentication a été développé pour vous offrir une API simple qui vous permettra d'utiliser l'authentification à partir de fournisseurs fédérés, un schéma d'adresse e-mail/mot de

passe simple, ou de vous intégrer à tout autre système d'authentification existant que vous possédez. Il s'intègre avec les services Firebase tels que la base de données en temps réel afin que vous puissiez contrôler qui accède à quelles données.

2.2 Realtime Database

Il s'agit d'une base de données NoSQL hébergée dans le cloud. Elle permet la synchronisation entre les appareils connectés et est disponible même en cas d'absence de connectivité réseau grâce à une mémoire cache locale. Il s'agit d'une base de données pilotée par les événements qui fonctionne très différemment des bases de données SQL traditionnelles. Il n'y a pas de code côté serveur et de niveaux d'accès à la base de données ; tout le codage est effectué côté client. Chaque fois que des données changent dans la base de données, des événements sont déclenchés dans le code client, et vous pouvez ensuite gérer et mettre à jour l'état de votre interface utilisateur en réponse. Elle contient un langage de règles basé sur les expressions, appelé Firebase Realtime Database Security Rules, qui définit la structure des données et les droits d'accès des utilisateurs à ces données. Sa conception ultime est d'être réactive, vous permettant de créer une expérience en temps réel pouvant servir de nombreux utilisateurs à grande échelle. Par conséquent, elle est un peu différente à programmer par rapport à une base de données traditionnelle.

2.3 Cloud Storage

En plus de stocker des données, il est fréquent que les applications stockent des fichiers tels que des photos ou des vidéos. Mettre en place et gérer une infrastructure pour gérer cela, en particulier une qui traite des fichiers volumineux comme des vidéos, peut être une tâche difficile et coûteuse. Cloud Storage for Firebase simplifie cela en fournissant une API simple qui est prise en charge par Google Cloud Storage. Dans le chapitre 4, vous examinerez cette API et verrez comment vous pouvez facilement gérer le téléchargement et le téléchargement de fichiers, y compris ce qu'il faut faire en cas de défaillance de communication et reprendre là où vous vous êtes arrêté.

Firebase Hosting Toutes les applications ont besoin d'un site web associé pour leur liste sur le Play Store ou l'App Store. Si vous utilisez Firebase, vous disposerez d'un espace d'hébergement que vous pouvez utiliser pour héberger des ressources statiques telles que du HTML, du CSS,

du JavaScript ou des images. En utilisant des frameworks JavaScript, vous pouvez créer des sites assez sophistiqués

2.4 Firebase Test Lab

Une plainte courante des développeurs d'applications, en particulier ceux qui utilisent Android, est qu'il est très difficile d'avoir accès à tous les types d'appareils dont vos utilisateurs finaux pourraient avoir besoin. Dans de nombreux cas, l'appareil n'est même pas disponible dans votre pays. Avec Firebase Test Lab, vous pouvez profiter des appareils hébergés par Google dans un centre de test pour vous ! Dans le chapitre 6, vous découvrirez des tests déjà écrits pour vous par Google (également appelés tests Robo) ainsi que la façon de créer vos propres tests. Vous verrez les résultats sous forme de captures d'écran et de rapports d'erreurs.

2.5 Firebase Crash Reporting

La principale ra0ison des mauvaises évaluations dans l'App Store et le Play Store est les plantages inattendus. Comprendre pourquoi une application a planté et le corriger rapidement est essentiel, mais c'est un processus très difficile si l'application s'exécute sur un appareil que vous ne connaissez pas, dans un pays ou une ville éloignée ! Crash Reporting vous aide en fournissant une trace de la pile de tous les plantages dans la console Firebase. Vous pouvez les utiliser pour comprendre la cause du plantage et déployer rapidement une correction. Vous pourriez même utiliser Firebase Cloud Messaging pour informer vos utilisateurs de la mise à jour, afin qu'ils puissent éviter le plantage à l'avenir !

2.6 Cloud Functions for Firebase

Bien que l'architecture Firebase soit principalement axée sur le code s'exécutant dans votre application mobile ou sur le front-end du site web, il y a souvent des situations où vous avez besoin d'exécuter de la logique côté back-end. Cloud Functions for Firebase vous permet d'écrire du code qui réagit aux événements sur les éléments Firebase. Par exemple, des modifications dans la base de données en temps réel, l'authentification ou d'autres éléments peuvent être utilisées pour déclencher une fonction.

Annexe 1

3 Création d'un projet Firebase

Dans cette partie on va voir les étapes et comment on peut créer un projet sur Firebase, c'est très simple de s'inscrire dedans.

1. Entre au lien https://firebase.google.com/ et on connecte en utilisant un compte Google.
2. Nous cliquions sur "Commencer" puis sur "Ajouter un projet" pour créer un nouveau projet.
3. Nous donnions un nom à notre projet, par exemple.PFE-DigitaTwin



Figure 2 Donner un nom au projet de firebase

4. Nous désactivions l'option "Activer Google Analytics pour ce projet" car elle n'est pas nécessaire, puis choisirons sur "Créer le projet".
5. Il faudra quelques secondes pour configurer votre projet. Ensuite, on clique sur "Continuer" lorsque tout est prêt.
6. Nous serions redirigé(e) vers la page de la console de votre projet.

3.1.1 Configurez les méthodes d'authentification.

Pour permettre l'authentification par e-mail et mot de passe, on deve d'abord configurer les méthodes d'authentification pour notre application.

"La plupart des applications ont besoin de connaître l'identité d'un utilisateur. En d'autres termes, cela gère la connexion et l'identification des utilisateurs (dans ce cas, l'ESP8266). Connaître l'identité d'un utilisateur permet à une application de sauvegarder en toute sécurité

les données utilisateur dans le cloud et de fournir la même expérience personnalisée sur tous les appareils de l'utilisateur." Pour en savoir plus sur les méthodes d'authentification,

1. Dans la barre latérale gauche, on clique sur "Authentification", puis sur "Commencer".

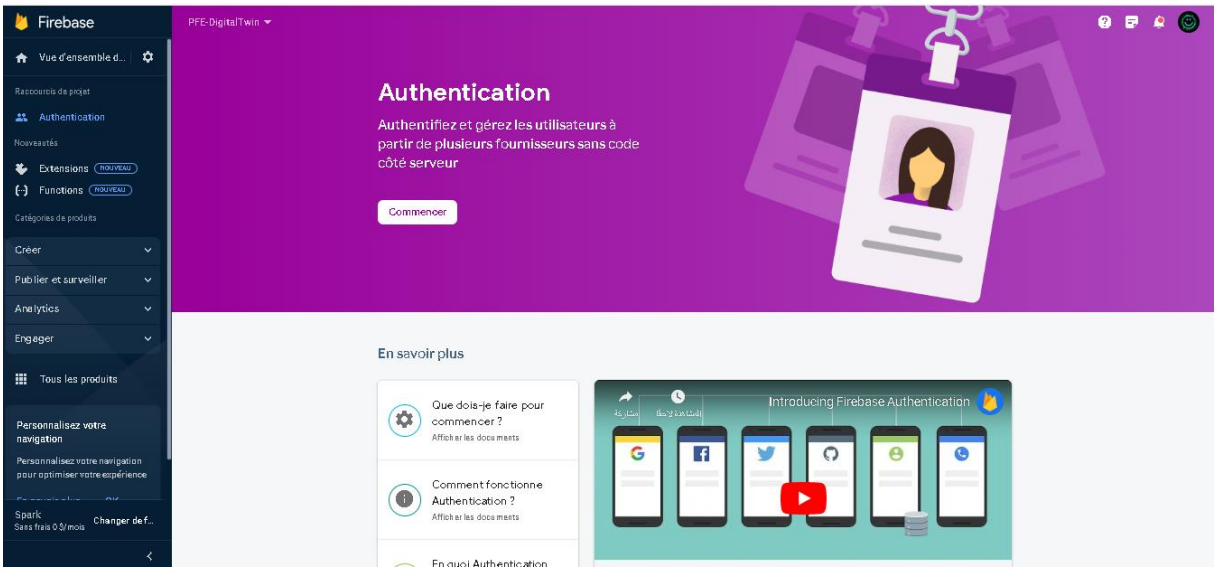


Figure 3 Firebase Authentication

2. Nous sélectionnions l'option "E-mail/Mot de passe".

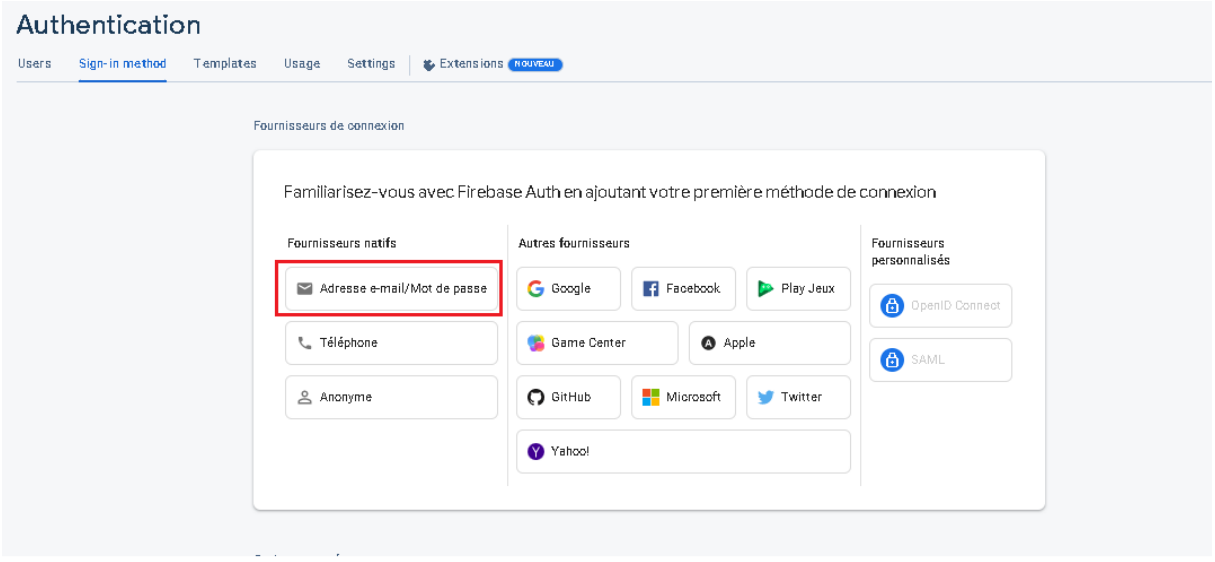


Figure 4 Choie de type de authentication

3. Nous activions cette méthode d'authentification et cliquer sur "Enregistrer"
4. L'authentification par e-mail et mot de passe devrait maintenant être activée.

5. Maintenant, nous devions ajouter un utilisateur. Sur l'onglet "Authentification", on sélectionne l'onglet "Utilisateurs" en haut. Ensuite, on clique sur "Ajouter un utilisateur".
6. Nous ajoutions une adresse e-mail pour l'utilisateur autorisé. Il peut s'agir d'une adresse e-mail Google ou de toute autre adresse e-mail. Nous pouvons également créer une adresse e-mail spécifique à ce projet. Nous ajoutions un mot de passe qui nous permettrait de nous connecter à notre application et d'accéder à la base de données. On n'oublie pas de conserver le mot de passe dans un endroit sécurisé car nous en avions besoin ultérieurement. Lorsque nous avons terminé, on clique sur "Ajouter un utilisateur".

Un nouvel utilisateur a été créé avec succès et ajouté à la table des utilisateurs.

3.1.2 Obtenir la clé API du projet

Pour interagir avec notre projet Firebase en utilisant la carte ESP8266, nous devons obtenir la clé API de notre projet. On suive les étapes suivantes pour obtenir notre clé API de projet :

1. Dans la barre latérale gauche, cliquez sur "Paramètres du projet".

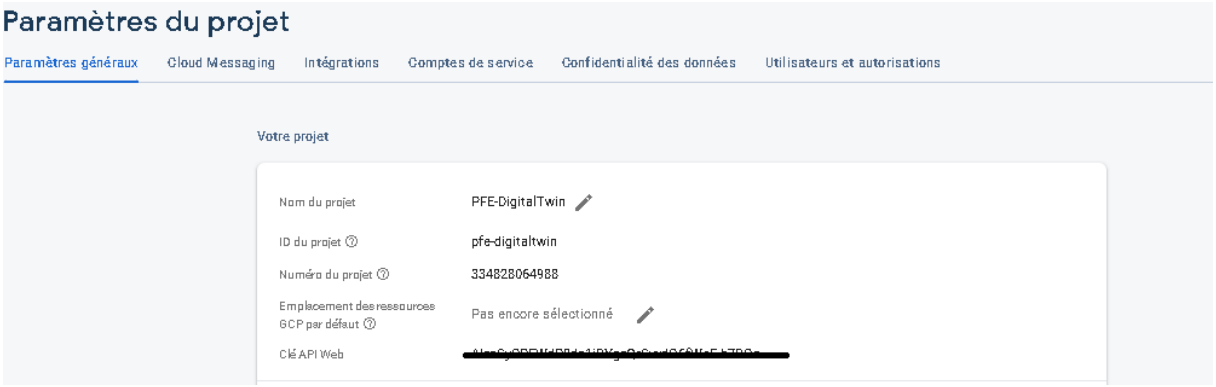


Figure 5 Paramètre du projet firebase

3.1.3 Configurer la base de données en temps réel (Realtime Database) :

Pour créer une base de données en temps réel (Realtime Database) et configurer les règles de la base de données pour notre projet, nous suivions les étapes suivantes :

1. Dans la barre latérale gauche, nous cliquions sur "Realtilme Database " puis cliquer sur "Créer une base de données"

Ensuite, nous cliquions sur "Créer une base de données".

Annexe 1

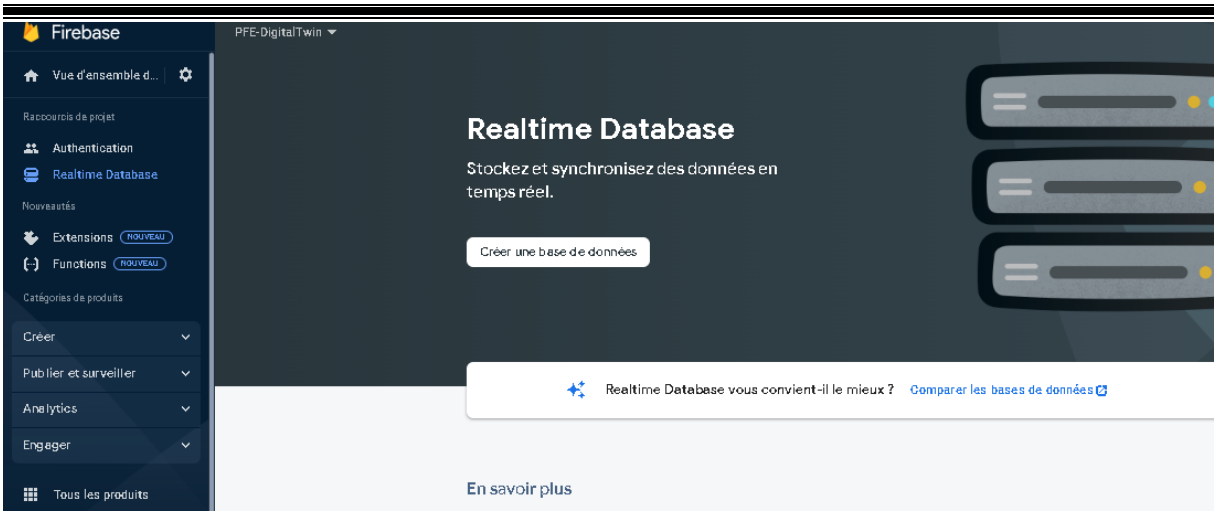


Figure 6 Page de Realtime Database de firebase

2. Nous sélectionnions l'emplacement de notre base de données. Il devrait être le plus proche de votre emplacement.

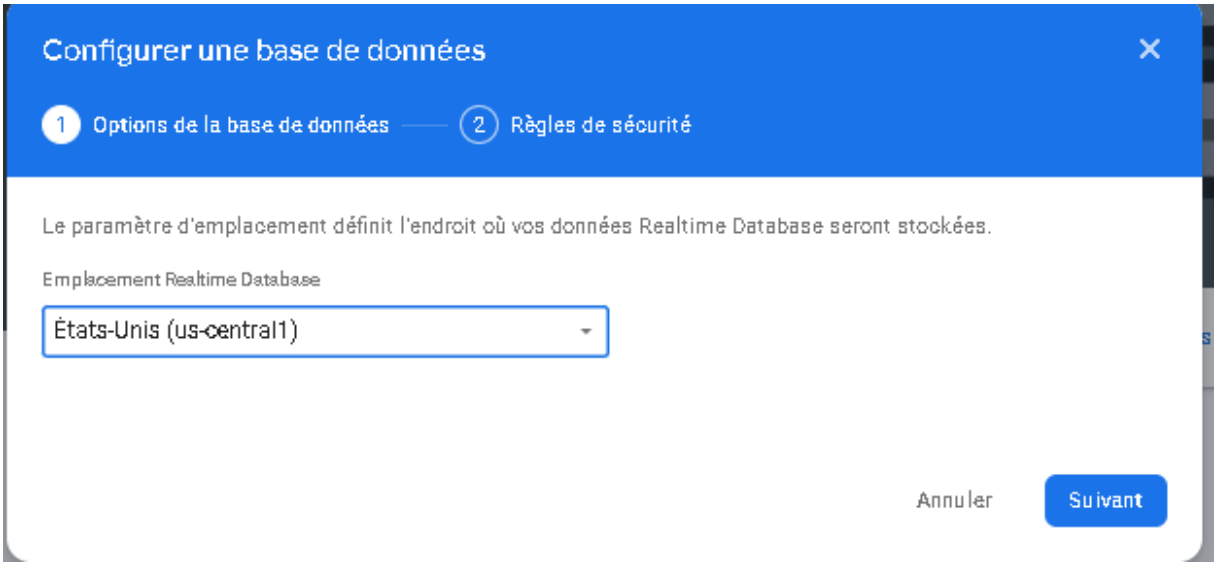


Figure 7 Choie de l'emplacement de notre base de données

3. Nous configurions les règles de sécurité pour votre base de données. Nous pouvons sélectionner "Commencer en mode de test". Nous allons modifier les règles de la base de données dans un instant.

Notre base de données est maintenant créée. l'URL de la base de données, mise en évidence dans l'image suivante.

Annexe 1

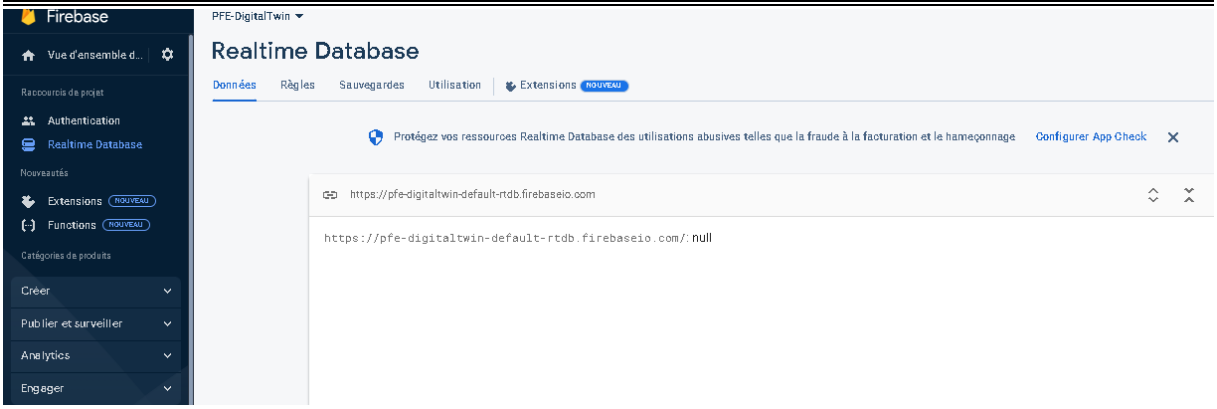


Figure 8 URL de la base de données

3.1.4 Créer une base de données Cloud Firestore

1. Dans la barre latérale gauche, on clique sur " Firestore Database " puis choiser "Créer une base de données"

Puis on clique sur "Créer une base de données"

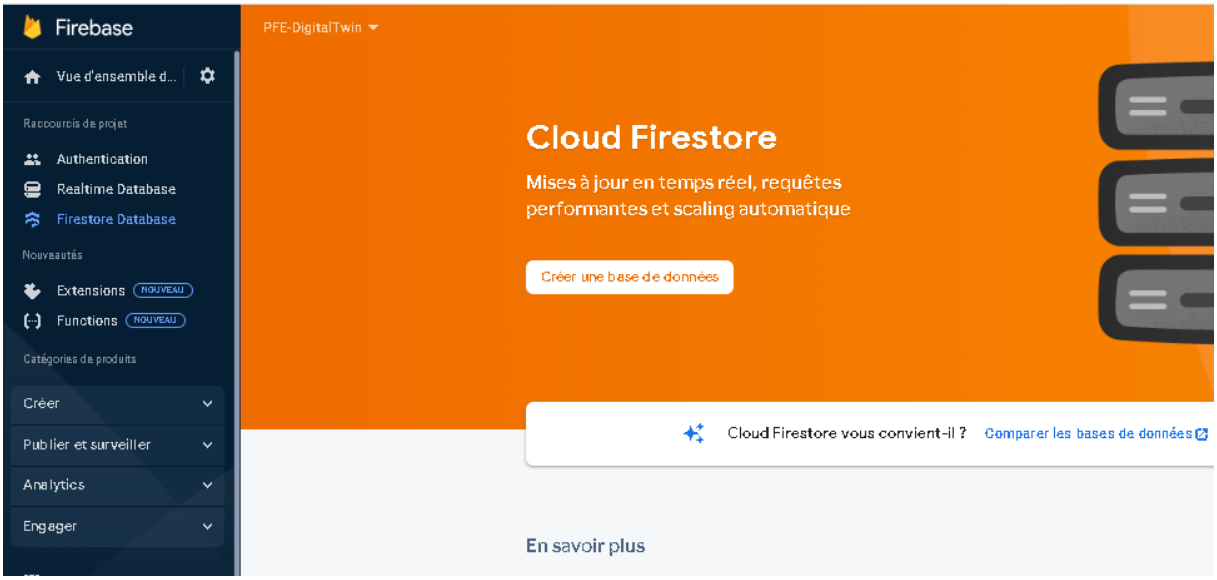


Figure 9 Page de Cloud Firebase

Nous configurions les règles de sécurité pour notre base de données. Nous pouvons sélectionner "Commencer en mode de test". Nous allons modifier les règles de la base de données dans un instant.

2. Nous sélectionnions l'emplacement de notre base de données. Il devrait être le plus proche de notre emplacement.

Notre base de données est maintenant créée

Annexe 2

Les outils hardware

1 ESP8266

L'ESP8266 est un microcontrôleur très populaire et polyvalent largement utilisé dans le domaine de l'Internet des objets (IoT). Il combine un processeur à faible consommation d'énergie avec une connectivité Wi-Fi intégrée, ce qui en fait un choix idéal pour la création de projets IoT.

L'ESP8266 dispose d'une architecture à microcontrôleur 32 bits et est livré avec une quantité suffisante de mémoire flash pour stocker des programmes et des données. Il peut être programmé à l'aide du langage de programmation Arduino, ce qui facilite son utilisation pour les développeurs familiers avec cette plateforme.

Grâce à sa connectivité Wi-Fi intégrée, l'ESP8266 peut se connecter à des réseaux locaux ou à Internet, permettant ainsi aux projets de communiquer avec d'autres appareils, d'accéder à des services en ligne et de transférer des données via le réseau.

L'ESP8266 offre également la possibilité de créer des serveurs web embarqués, ce qui permet aux projets de fournir des interfaces de contrôle et d'interaction via un navigateur web. Cela ouvre de nombreuses possibilités pour la création de systèmes de surveillance, de contrôle à distance et d'applications basées sur le web.

En plus de sa connectivité Wi-Fi, l'ESP8266 dispose également de broches d'entrée/sortie (GPIO) qui permettent de connecter différents capteurs, actionneurs et autres composants électroniques. Cela permet de créer des projets IoT complexes et de les intégrer à des environnements physiques.

Les caractéristiques de carte Wifi de ESP8266

- Norme : 802.11 b/g/n.
- Fréquence : entre 2,4Ghz et 2,5Ghz.
- Puissance d’émission : o 802.11 b: ＋20 dBm o 802.11 g: ＋17 dBm o 802.11 n: ＋14 dBm
- Sensibilité de réception :
  - 802.11 b: －91 dbm (11 Mbps)

- 802.11 g: −75 dbm (54 Mbps)
- 802.11 n: −72 dbm (MCS7)

Les broches d'ESP8266

ESP8266 possède 30 broches divisé sur plusieurs utilisations comme est déjà mentionné, et grâce à la fonction de multiplexage plusieurs fonctions sont attribuées à la même broche.

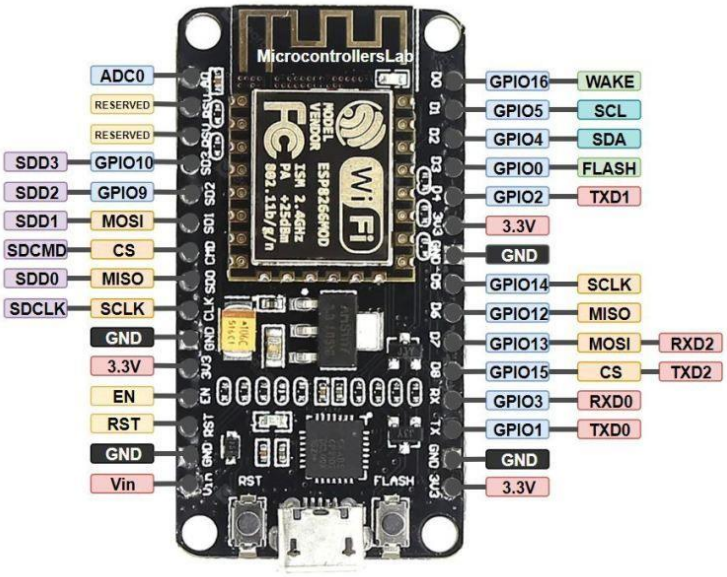


Figure 10 Broches d'ESP8266

Pour commencer à utiliser la carte électronique ESP8266, voici les étapes à suivre

1. Installation du logiciel :
    - Téléchargez et installez l'IDE Arduino depuis le site officiel (https://www.arduino.cc/en/software).
    - Ouvrez l'IDE Arduino et allez dans les Préférences.
    - Dans l'onglet "Paramètres supplémentaires de gestionnaire de cartes", ajoutez l'URL suivante : "http://arduino.esp8266.com/stable/package_esp8266com_index.json".
    - Cliquez sur OK pour fermer la fenêtre des préférences.

Annexe 2

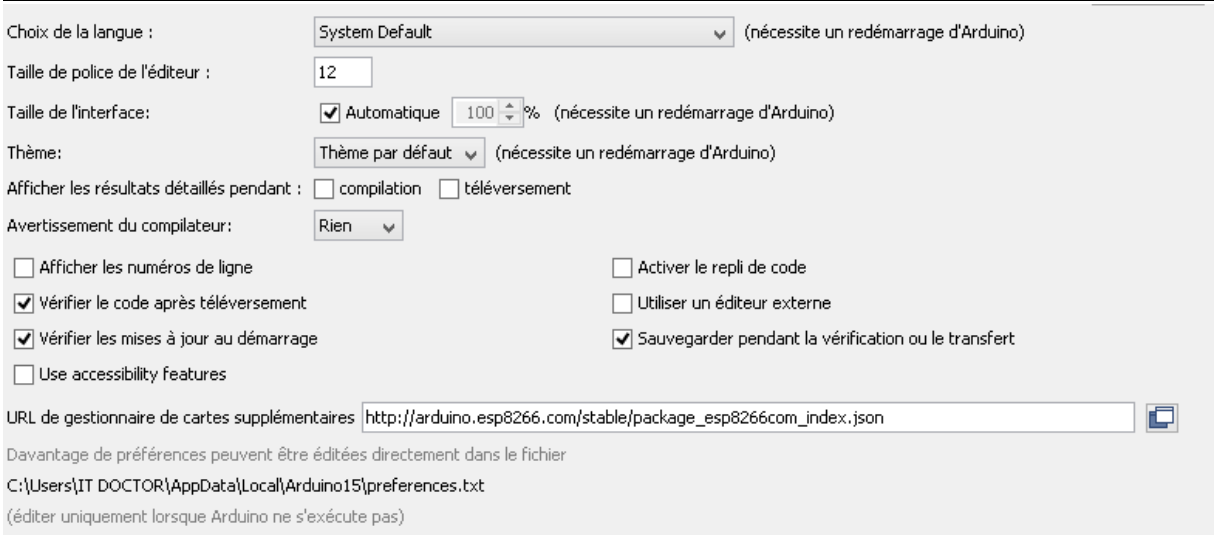


Figure 11 Configuration Arduino IDE

2. Installation du support ESP8266 :
    - Allez dans Outils -> Type de carte -> Gestionnaire de cartes.
    - Recherchez "ESP8266" dans la barre de recherche.
    - Sélectionnez "esp8266 by ESP8266 Community" et cliquez sur "Installer".

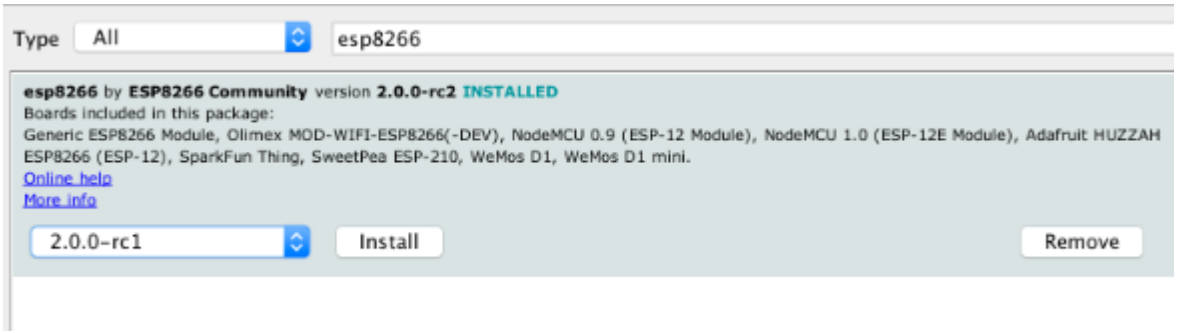


Figure 12 Installation du support ESP8266

    - Attendez que l'installation soit terminée.
3. Sélection de la carte :
    - Branchez votre carte ESP8266 à votre ordinateur à l'aide du câble USB.
    - Dans l'IDE Arduino, allez dans Outils -> Type de carte et sélectionnez votre modèle d'ESP8266 (par exemple, "Generic ESP8266 Module").
    - Sélectionnez le bon port série dans Outils -> Port.

2 Le capteur de température et d'humidité DHT11.

Le capteur de température et d'humidité DHT11 communique avec un microcontrôleur via un port série. Livré avec résistance de "pull-up" pour la sortie data.

Annexe 2

2.1 Caractéristiques :

- Alimentation: 3 à 5 Vcc
- Consommation maxi: 2,5 mA
- Plage de mesure:
  - ✓ température: 0 à +50 °C
  - ✓ humidité: 20 à 100 % HR
- Précision:
  - ✓ température: ± 2 °C
  - ✓ humidité: ± 5 % HR
- Dimensions: 16 x 12 x 7 mm

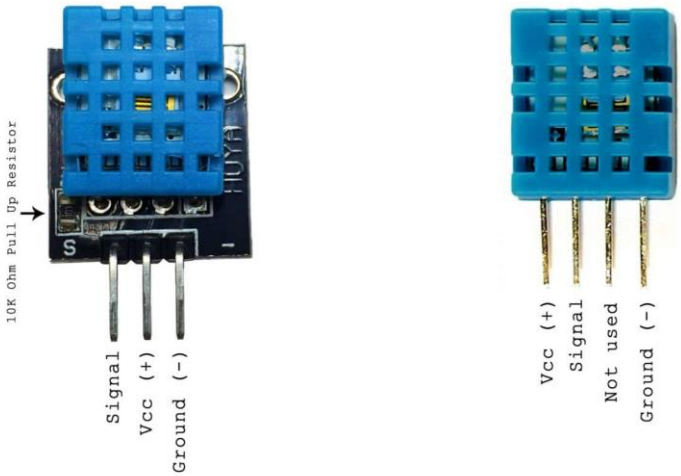


Figure 13 DHT11

3 Capteur d'humidité du sol

Ce module capteur d'humidité permet de connaître la concentration d'eau dans la terre par exemple. Le capteur se raccorde sur une entrée analogique d'une carte Arduino ou compatible.

3.1 Applications:

- Contrôle d'humidité pour plantes
- détecteur d'eau etc.

3.2 Caractéristiques :

- Tension de fonctionnement : 3,3 V ~ 5V
- Double mode de sortie, la sortie analogique plus précise
- Un trou de boulon fixe pour une installation facile
- Avec indicateur d'alimentation (rouge) et l'indicateur de sortie de commutation numérique (vert)
- Panneau PCB Dimension : Approx.3cm x 1.5cm
- Sol Sonde Dimension : env. 6cm x 3cm
- Longueur du câble : Approx.21cm
- Description de l'interface (4 fils) :
- VCC : 3.3V-5V
- GND : GND
- DO : interface de sortie numérique (0 et 1)
- AO : l'interface de sortie analogique

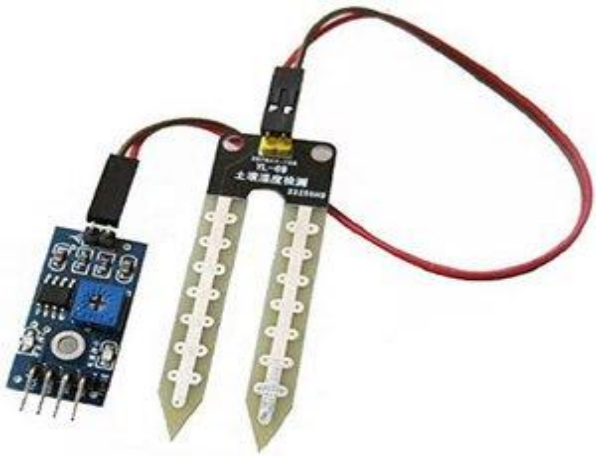


Figure 14 Capteur d'humidité du sol

4 Capteur de luminosité

Le capteur de luminosité permet de mesurer la quantité de lumière. Le convertisseur analogique est intégré dans celui-ci.

4.1 CARACTERISTIQUES

Alimentation : 5 V

Plage de mesure : 0 à 55 m/s

Sortie analogique Précision : +/- 5 %

Annexe 2

5 Capteur de niveau d'eau

Ce module didactique délivre une tension analogique en fonction du niveau d'eau grâce à ses pistes imprimées. Le capteur délivre « 700 » lorsque le niveau et « 400 » est au plus bas.

5.1 Caractéristiques:

Alimentation : 5 Vcc

Connecteurs : 3 broches (Vcc, GND et Signal)

Dimensions : 60 x 21 x 7 mm



Figure 15 Capteur de niveau d'eau

6 Capteur de gaz MQ7

Module comportant un capteur MQ7 permettant de détecter plusieurs type de gaz: le LPG, Isobutane (C4H10), le propane (C3H8), le méthane (CH4), l'hydrogène (H2), l'alcool et la fumée. Ce module est compatible Arduino et Raspberry Pi via une sortie analogique.

6.1 Caractéristiques:

- Alimentation: 5 Vcc
- Plage de mesure: 10 à 10000 ppm
- Sortie analogique et digitale (seuil ajustable via potentiomètre)
- Sensibilité: 2 à 20 KΩ
- Faible temps de réponse
- Haute sensibilité
- Température de service: -20 à 50 °C
- Compatibilité: Arduino et Raspberry Pi

Annexe 2

- Dimensions: 30 x 20 x 22 mm



Figure 16 Capteur MQ-7

Multiplexeur CD4051

Caractéristique

- Large gamme de niveaux de signaux numériques et analogiques
    - Numériques . . . . . 3V to 20
    - Analogiques . . . . . ≤20VP-P
- Faible résistance ON, 125Ω (Typ) sur l'entrée de signal 15V_{P-P} Gamme pour V_{DD}-V_{EE} = 18V
- Haute résistance OFF, fuite de canal de ± 100 pA (typique) à V_{DD}-V_{EE} = 18V
- Conversion de niveau logique pour les signaux d'adressage numérique de 3V à 20V (V_{DD}-V_{SS}=3V à 20V) pour commuter analogique Signaux vers 20V_{P-P}(V_{DD}-V_{EE} = 20V)
- Caractéristiques de commutation adaptées, r_{ON} = 5Ω (Typ) pour V_{DD}-V_{EE} = 15V
- Très faible dissipation de puissance au repos dans toutes les conditions d'entrée et d'alimentation Digital Control, 0,2 µW (typique) à V_{DD}-V_{SS} = V_{DD}-V_{EE}= 10V
- Décodage d'adresse binaire sur puce
- Valeurs paramétriques 5 V, 10 V et 15 V
- Testé à 100 % pour le courant de repos à 20 V
- Courant d'entrée maximal de 1 µA à 18 V sur l'ensemble complet
- Plage de température, 100nA à 18V et 25^0C
- La commutation Break-Before-Make élimine le canal Chevaucher

Application

- Multiplexage et démultiplexage analogiques et numériques

- Conversion A/N et N/A
- Gating de signal

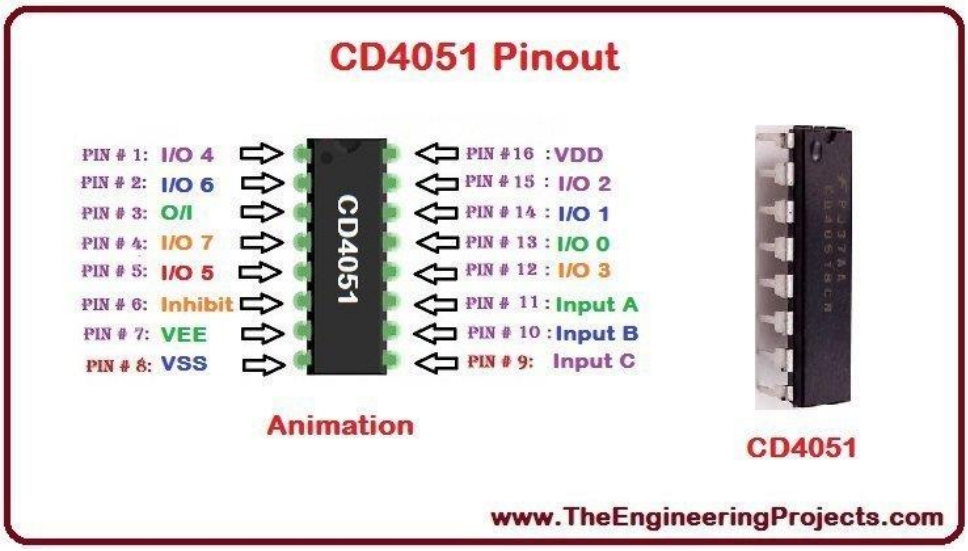


Figure 17 E/S de CD4051

Annexe 3

Vs code

Vs code Visual Studio Code est un puissant environnement de développement intégré (IDE) dédié à la création d'applications Web et de programmes cloud. Cet outil léger offre des fonctionnalités complètes de révision et de compilation, le tout dans une interface moderne et élégante. L'un des points forts de Visual Studio Code est sa capacité de contrôle Git, qui facilite les tests, la construction, l'emballage et même le déploiement de différents types de logiciels. Vous pouvez créer plusieurs tâches au sein de Visual Studio Code, les enregistrer dans le projet souhaité et les configurer rapidement en établissant les arguments appropriés. Vous pouvez utiliser des extraits de code préexistants ou générer vos propres fragments de code que vous pourrez ensuite enregistrer. Le logiciel prend également en charge l'exportation de projets sous forme de fichiers texte et fonctionne avec de nombreux langages de programmation, dont C#, C++, Clojure, F#, HTML, JSON, Java, Lua, PHP, Perl, Python, SQL, Visual Basic, XML, et bien d'autres. De plus, le programme prend en charge le développement avec Node.js et ASP.NET.

L'interface graphique intuitive de Visual Studio Code vous permet d'ouvrir plusieurs instances simultanément et offre un espace de travail flexible pouvant être divisé en deux. Cette fonctionnalité facilite la comparaison du code, vous permettant d'identifier visuellement les problèmes. Le puissant moteur de recherche vous permet de trouver des composants, des fichiers, des programmes ou tout autre élément correspondant au nom recherché. La fonctionnalité Git vous permet de travailler avec un référentiel via le dossier local dédié. Vous pouvez accéder à toutes les fonctionnalités Git disponibles en ouvrant la racine du référentiel. Le programme propose également une fonction de débogage conçue pour vous aider à surveiller les variables et les composants. Vous pouvez également contrôler la pile d'appels et définir des points d'arrêt.

Visual Studio Code prend en charge l'utilisation de fragments de code, une fonctionnalité qui vous permet de réduire considérablement le temps passé à écrire du code. Vous pouvez facilement lancer l'application chargée ou associer le code sélectionné au script principal. Le programme est personnalisable, vous permettant de modifier plusieurs paramètres, de la disposition de l'espace de travail à la configuration HTTP, recherche ou CSS.

Annexe 3

Instructions d'installation du package :

1. Téléchargez le dernier package d'installation depuis la page de téléchargement correspondant à votre système d'exploitation.
2. Extrayez le fichier d'installation téléchargé.
3. Copiez les répertoires et fichiers téléchargés dans le dossier approprié après avoir décompressé le fichier téléchargé.
4. Exécutez le fichier d'installation téléchargé.

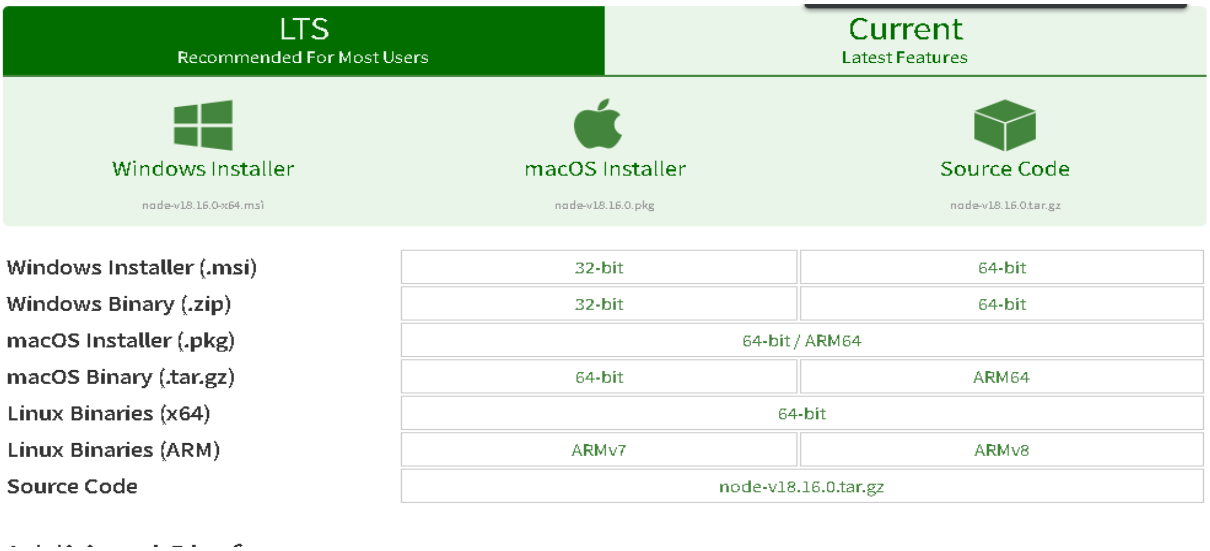


Figure 18 Page officiel de vs code

Cree un dossier de notre projet et ouvrer avec VS code «cliquer sur ‘open floder’

Annexe 3

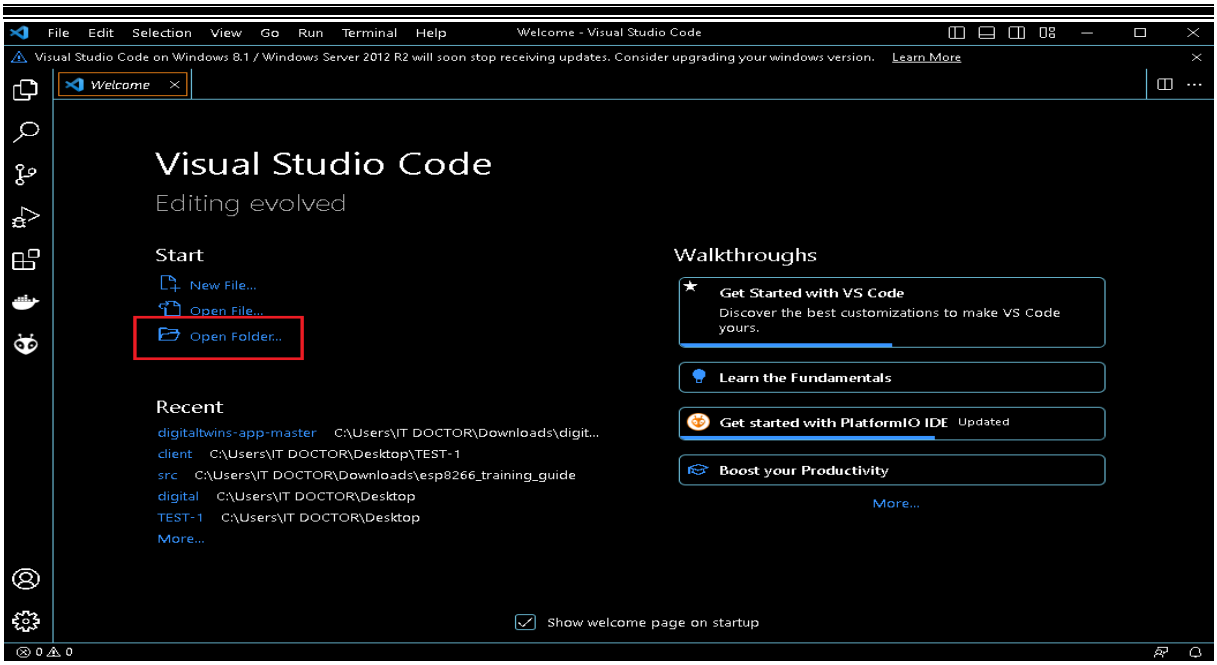


Figure 1 Logiciel vs code

Ouvrir une nouvelle termnalle

7 Créer un nouveau projet React

Exécutez la commande « npx create-react-app client » pour créer un nouveau projet React avec Create React App

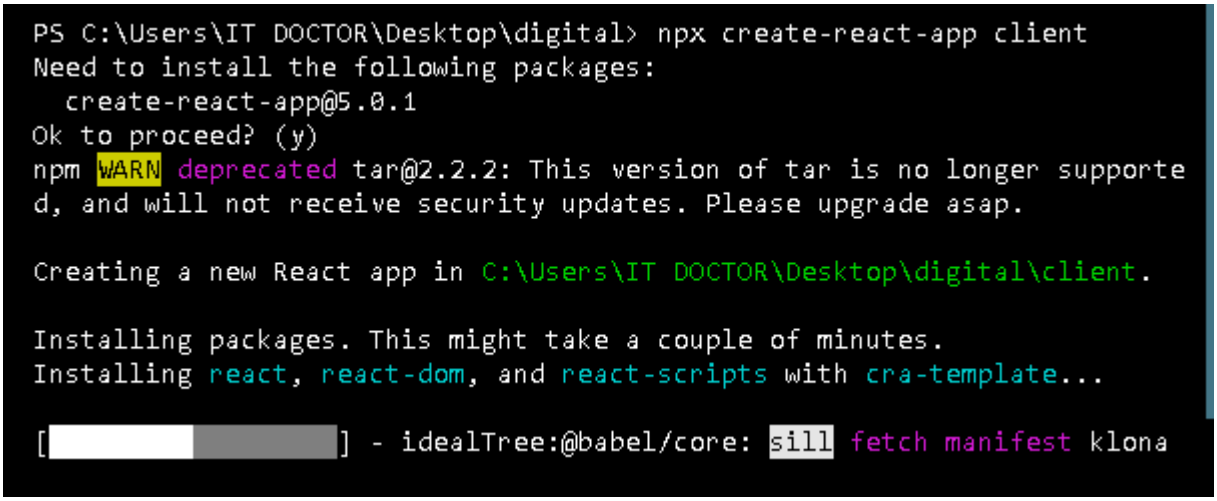


Figure 19 Création d'un projet REACT

Une fois la création terminée, vous pouvez accéder au répertoire du projet en utilisant la commande « cd client » pour accéder au répertoire nouvellement créé

Exécutez la commande « npm install three @react-three/fiber @react-three/drei» Cette commande va télécharger et installer les packages '**three, @react-three/fiber'** et '**@react-**

three/drei' depuis le registre npm et les ajouter comme dépendances dans votre fichier **package.json**.

Une fois l'installation terminée, on ouvre deux nouveaux documents components pages, et un fichier firebase.j

Annexe 4

Blender

Avec Blender, nous pouvons créer des visualisations 3D telles que des images fixes, des animations 3D, des plans VFX et du montage vidéo. Il est bien adapté aux particuliers et aux petits studios qui bénéficient de son pipeline unifié et de son processus de développement réactif.

Étant une application multi-plateforme, Blender fonctionne sous Linux, macOS, ainsi que sous les systèmes Windows. Il nécessite également relativement peu de mémoire et de disque dur par rapport aux autres suites de création 3D. Son interface utilise OpenGL pour offrir une expérience cohérente sur l'ensemble du matériel et des plateformes pris en charge.

L'histoire de Blender

L'histoire de Blender commence en 1988 lorsque Ton Roosendaal cofonde le studio d'animation néerlandais NeoGeo. NeoGeo devient rapidement l'un des studios d'animation 3D les plus importants des Pays-Bas et en Europe, réalisant des productions primées pour des entreprises telles que Philips. Cependant, Ton se rend compte que l'outil 3D utilisé par NeoGeo est obsolète et décide de le reconstruire complètement. En 1995, cette refonte aboutit à la création de Blender, un logiciel de création 3D.

En 1998, Ton fonde une nouvelle société appelée Not a Number (NaN) pour développer et commercialiser Blender. L'objectif de NaN est de fournir une suite de création graphique 3D compacte et multiplateforme gratuitement, offrant ainsi des outils de modélisation et d'animation 3D professionnels au grand public. NaN participe à sa première conférence SIGGRAPH en 1999, où Blender suscite un immense intérêt.

En 2000, NaN obtient un financement de 4,5 millions d'euros, ce qui permet à l'entreprise de se développer rapidement. Blender 2.0 est lancé, incluant un moteur de jeu intégré. À la fin de l'année, le nombre d'utilisateurs enregistrés sur le site web de NaN dépasse les 250 000.

Cependant, les ambitions de NaN dépassent ses ressources et le marché n'est pas favorable. En avril 2001, NaN réduit ses activités et lance Blender Publisher, une version commerciale de Blender ciblant les médias 3D interactifs sur Internet. Malheureusement, en raison de ventes

décevantes et d'un climat économique difficile, les investisseurs décident de mettre fin à toutes les activités de NaN, y compris le développement de Blender.

Malgré les défauts de Blender à l'époque, la communauté d'utilisateurs et les clients qui ont acheté Blender Publisher manifestent un soutien enthousiaste. Ton Roosendaal décide de ne pas laisser le logiciel disparaître et crée la Blender Foundation, une organisation à but non lucratif, en mars 2002.

Le principal objectif de la Blender Foundation est de développer et promouvoir Blender en tant que projet open source communautaire. En juillet 2002, Ton parvient à convaincre les investisseurs de NaN de rendre Blender open source. Une campagne de collecte de fonds appelée "Free Blender" est lancée pour racheter les droits du code source et de la propriété intellectuelle de Blender. La campagne atteint son objectif de 100 000 € en seulement sept semaines. Le 13 octobre 2002, Blender est remis à la communauté sous la licence GNU GPL (GNU General Public License).

Depuis lors, le développement de Blender se poursuit grâce à une équipe de bénévoles dévoués du monde entier, supervisée par Ton Roosendaal.

Blender est un logiciel de création 3D polyvalent et open source qui permet de réaliser des images fixes, des animations, des effets visuels et du montage vidéo. Voici un résumé de son fonctionnement :

1. Interface utilisateur : Blender propose une interface utilisateur complexe mais puissante. Elle est composée de différents panneaux, menus et boutons pour accéder aux fonctionnalités et aux outils du logiciel.

Annexe 4

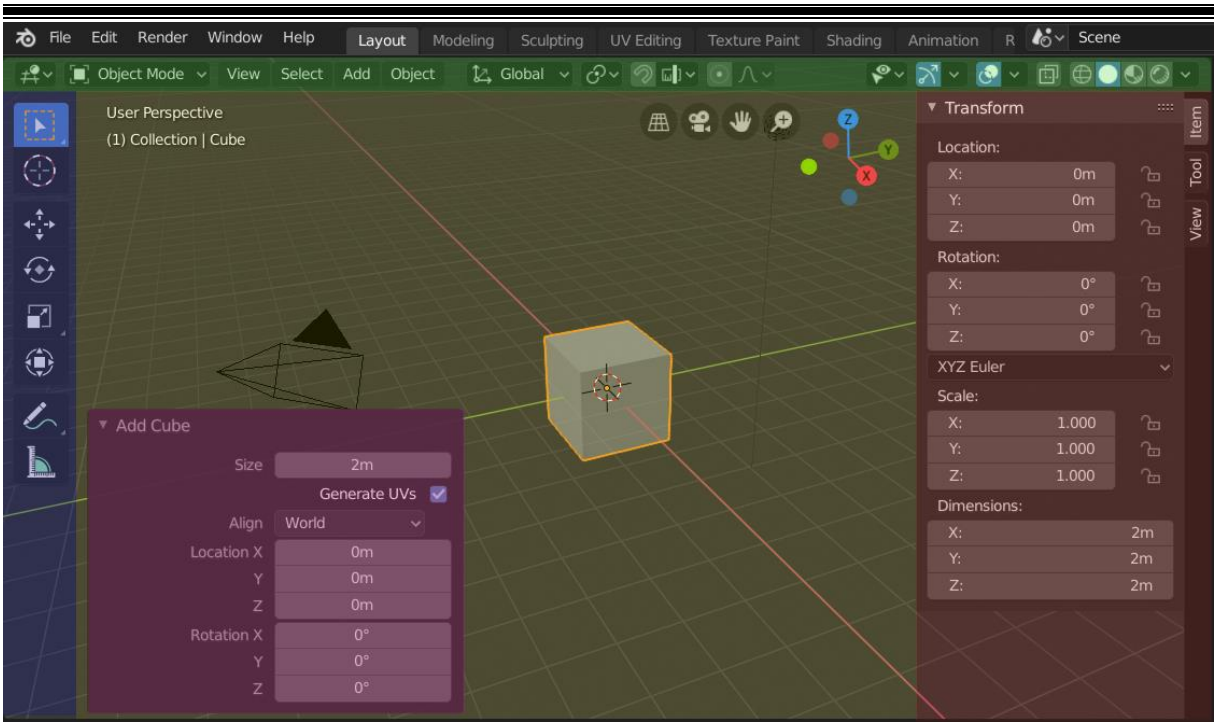


Figure 20 Interface initiale de Blender

2. Modélisation 3D : Blender permet de créer des objets en 3D à partir de formes de base telles que des cubes, des sphères, des cylindres, etc. Il offre également des outils avancés de modélisation tels que la sculpture, le lissage, les courbes et les surfaces pour créer des formes plus complexes.

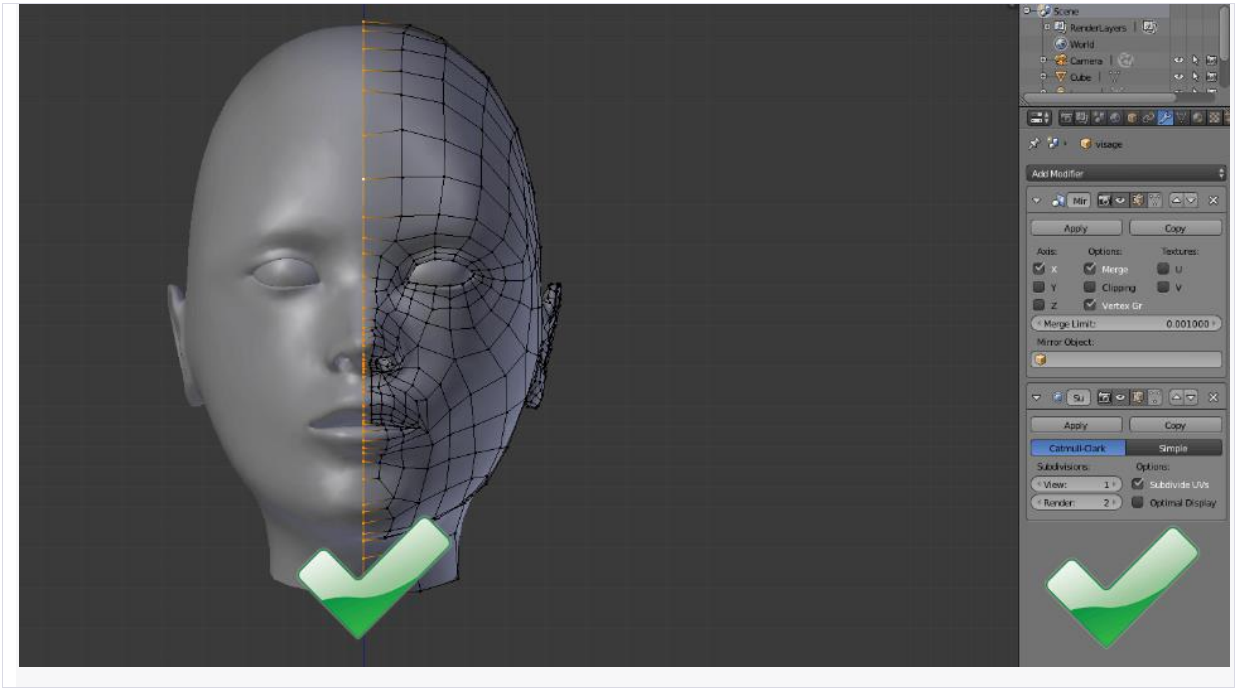


Figure 21 Blender modélisation

3. Textures et matériaux : Blender permet d'appliquer des textures et des matériaux réalistes aux objets 3D. Il offre un système de nodes (nœuds) qui permet de créer des matériaux complexes en combinant différentes textures, shaders et effets.



Figure 22 Création de matériaux par Blender

4. Animation : Blender offre un puissant système d'animation qui permet de donner vie aux objets 3D. Il propose des outils pour définir des mouvements, des transformations et des interactions entre les objets. Il est également possible de créer des simulations physiques, telles que la gravité, les collisions et les fluides.

Annexe 4

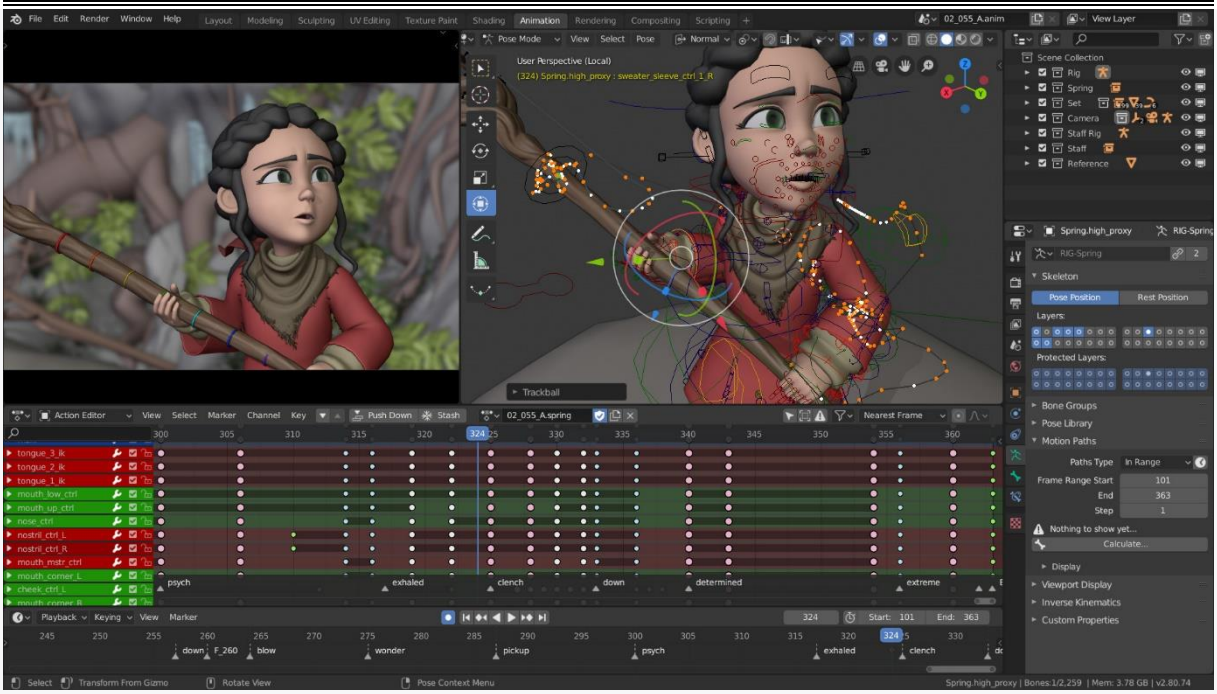


Figure 2 Animation par Blender

5. Éclairage et rendu : Blender permet de configurer des éclairages réalistes dans une scène 3D. Il offre différents types de lumières, tels que les sources lumineuses ponctuelles, les spots et les lumières directionnelles. Une fois la scène configurée, Blender peut procéder au rendu final, c'est-à-dire la génération de l'image ou de l'animation.

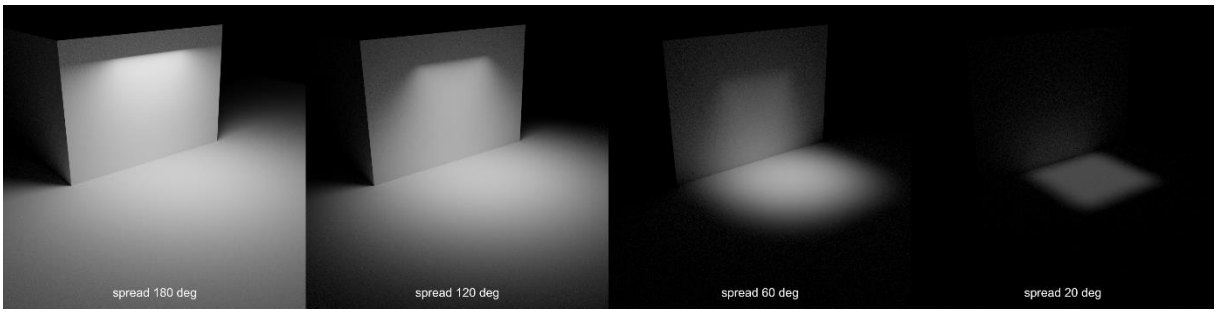
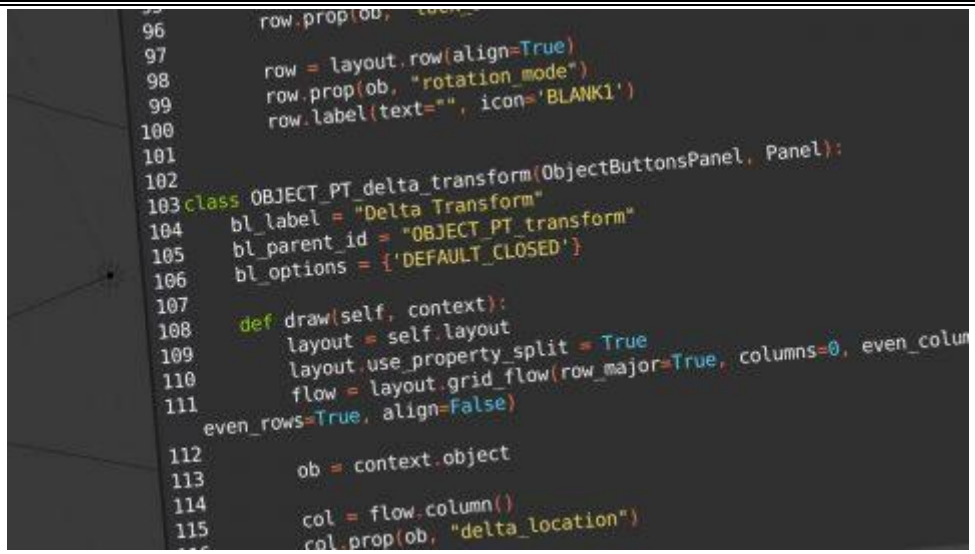


Figure 23 Règle de lumière avec Blender

6. Composition et montage vidéo : Blender comprend également des fonctionnalités de composition et de montage vidéo. Il permet d'ajouter des effets spéciaux, des titres, de faire du composition, de l'édition non linéaire et d'ajuster les couleurs pour créer des vidéos finales.
7. Scripts et extensions : Blender est hautement personnalisable grâce à son système de scripts et d'extensions. Les utilisateurs peuvent écrire leurs propres scripts pour automatiser des tâches ou ajouter de nouvelles fonctionnalités en utilisant le langage de script Python.

Annexe 4



```
        row.prop(ob, "
        row = layout.row(align=True)
        row.prop(ob, "rotation_mode")
        row.label(text="", icon='BLANK1')


class OBJECT_PT_delta_transform(ObjectButtonsPanel, Panel):
    bl_label = "Delta Transform"
    bl_parent_id = "OBJECT_PT_transform"
    bl_options = {'DEFAULT_CLOSED'}

    def draw(self, context):
        layout = self.layout
        layout.use_property_split = True
        flow = layout.grid_flow(row_major=True, columns=0, even_colum
even_rows=True, align=False)

        ob = context.object

        col = flow.column()
        col.prop(ob, "delta_location")
```

Figure 24 script in Blender

8. Communauté active : Blender bénéficie d'une communauté active et dévouée qui contribue au développement du logiciel, partage des ressources, des tutoriels et des plugins. Cette communauté offre un soutien et une assistance aux utilisateurs de Blender à tous les niveaux.

Annexe 5

WebSocket [45] [46] [47]

Le protocole WebSocket a été développé pour permettre un échange constant de données entre le client et le serveur, une fonctionnalité qui n'était pas prise en charge par le protocole HTTP. Il offre une communication bidirectionnelle complète via un seul socket, et contrairement à HTTP, il permet une communication asynchrone, ce qui signifie que les deux parties peuvent envoyer des données à tout moment tant que la connexion est établie.

Le protocole WebSocket se divise en deux parties : la poignée de main (handshake) et le transfert de données. Pendant la poignée de main, le client et le serveur établissent une communication initiale en utilisant le protocole HTTP sur le port par défaut 80. Une fois cette communication initiale établie et vérifiée, le protocole WebSocket est utilisé pour l'échange de données.

En termes de communication, contrairement à une requête HTTP qui peut contenir une surcharge de 500 à 800 octets de métadonnées et de cookies, le protocole WebSocket utilise un format de trame binaire personnalisé. Chaque message est divisé en une ou plusieurs trames, qui sont réassemblées à destination. Les en-têtes de trame ont une taille de 2 à 10 octets lorsqu'ils sont envoyés par le serveur et de 6 à 14 octets lorsqu'ils sont envoyés par le client (le client ajoute une clé de masquage pour prévenir les attaques de contamination du cache). Le protocole WebSocket est également considéré comme l'un des moyens de transport de données les plus polyvalents, offrant des capacités de personnalisation grâce à des interfaces de programmation (API), des extensions et des sous-protocoles, tels que les extensions de compression et de multiplexage.

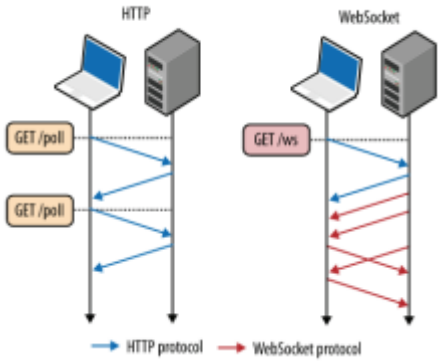


Figure 25 Flux de communication entre les protocoles HTTP et WebSocket