

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université A/Mira de Béjaia
Faculté des Sciences Exactes
Département d'Informatique



Mémoire de fin de cycle

En vue de l'obtention du diplôme Master en Informatique

Option :

Administration et sécurité des réseaux

THÈME

Réseau 5G : étude et simulation d'un scenario d'une ville intelligente

Réalisé par :

M^{elle} HADJOUT Siham

M^{elle} CHAOUADI Kenza

Soutenu le

04 juillet 2022

Devant le jury composée de :

Président	M ^r MOKETFI Mohand	M.C.B	U. A/Mira Bejaia.
Examineur	M ^r BOUADEM Nassima	M.C.B	U. A/Mira Bejaia.
Encadrant	M ^{me} HOUHA Amel	M.A.A	U. A/Mira Bejaia.

Promotion 2021/2022

Remerciements

Tout d'abord nous remercions dieu le tout puissant de nous avoir donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire.

Ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu voir le jour sans l'aide de notre encadrant M^{me} Amel HOUHA que nous remercions pour la qualité de son encadrement exceptionnel, pour sa patience, sa rigueur et sa disponibilité durant toute la période de préparation de ce mémoire.

Nos remerciements chaleureux vont aux membres du jury qui ont consacré une partie de leur temps pour examiner et juger notre travail.

Nos remerciements sont adressés également à tous nos professeurs et les membres du département informatique de l'université A/Mira.

Que tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail trouvent ici l'expression de nos sincères gratitude.

Dédicaces

Je dédie ce travail A mes parents,

Aucune dédicace très chère maman, ne pourrait exprimer la profondeur des sentiments que j'éprouve pour toi, tes sacrifices innombrables et ton dévouement firent pour moi un encouragement.

Tu as toujours été pour moi un exemple du père respectueux, honnête, de la personne méticuleuse, je tiens à honorer l'homme que tu es. Grâce à toi papa j'ai appris le sens du travail et de la responsabilité. Je voudrais te remercier pour ton amour, ta générosité et ta compréhension

mon frère, celui qui a toujours su me remonter le morale lors de la réalisation de ce travail

A l'homme de ma vie, mon exemple éternel, mon soutien moral et source de joie et de bonheur, celui qui s'est toujours sacrifié pour me voir heureuse

À ma famille, ma belle famille, mes amis et à toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

À ma très chère binôme Kenza, pas de mots pour exprimer mes remerciements envers toi, pour ton soutien, tes encouragements que tu m'as donné et ta patience avec moi pendant ces cinq dernières années.

Siham

Dédicaces

Tous les mots ne sauraient exprimer la gratitude, l'amour, le respect et la reconnaissance que j'ai, tout simplement je dédie ce travail :

À mes chers parents qui n'ont pas cessés de m'encourager sans vous rien ne n'aurait été possible,

Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai pour vous.

j'espère que vous étiez fières de votre fille

À mes chers frères et sœurs que dieu vous procure bonne santé et une longue vie.

À ma famille et mes amis et à toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

À ma très chère binôme Siham, pas de mots pour exprimer mes remerciements envers toi, pour ton soutien, tes encouragements que tu m'as donné et ta patience avec moi pendant ces cinq dernières années.

Kenza

Table des matières

Table des matières	iv
Liste des figures	vi
Liste des tableaux	vii
Liste des abréviations	viii
Introduction générale	1
1 les réseaux cellulaires	3
1.1 Introduction	4
1.2 Définition du concept cellulaire	4
1.3 historique des réseaux mobiles	5
1.3.1 La première génération 1G	6
1.3.2 La deuxième génération 2G/GSM	6
1.3.3 La troisième génération 3G/UMTS	6
1.3.4 La quatrième génération 4G/LTE	6
1.4 Vers la nouvelle génération des réseaux mobiles : 5G	7
1.4.1 Historique	7
1.4.2 Présentation	7
1.4.3 Mobilité en 5G	7
1.4.4 Objectifs de la 5G	10
1.4.5 Exigences de la 5G	12
1.4.6 Avantages de la 5G	13
1.4.7 Dangers de la 5G	14
1.4.8 Différence entre la 4G et la 5G	15

1.4.9	5G SA et 5G NSA	16
1.4.10	L'IPv4 ou l'IPv6 pour la 5G ?	16
1.5	Internet of things	18
1.5.1	Définition	18
1.5.2	Dimensions de l'IoT	20
1.5.3	Architecture de l'IoT	20
1.5.4	Composants d'un système d'IoT	20
1.6	Réseaux véhiculaires	22
1.6.1	Présentation	22
1.6.2	Caractéristiques	24
1.6.3	Types de communication	24
1.7	Conclusion	25
2	Défis et Technologies	26
2.1	Introduction	27
2.2	Défis de la 5G	27
2.2.1	De nouveaux modèles économiques centrés sur les marchés verticaux	27
2.2.2	l'harmonisation du spectre	29
2.2.3	Enjeux de la neutralité de l'internet	30
2.2.4	Des cellules de plus en plus petites	31
2.2.5	Maximisation de la couverture et minimisation de nombre d'antennes	32
2.3	Les technologies révolutionnaires sur lesquelles repose la 5G	34
2.3.1	Massive MIMO	34
2.3.2	Network slicing(découpe réseau en tranches)	35
2.3.3	Beamforming(La création de faisceaux directifs)	35
2.3.4	Bandes millimétriques	36
2.3.5	Communication Full duplex	36
2.4	Conclusion	37
3	Communication et Modèles	38
3.1	Introduction	39
3.2	Communication dans les réseaux sans fil	39
3.2.1	Réseaux avec infrastructures	39

3.2.2	Réseaux sans infrastructures	40
3.3	Protocoles de communication	41
3.3.1	Technologies utilisés dans l'IOT	41
3.4	System of systems	45
3.4.1	Définition	45
3.4.2	Types de SOS	45
3.4.3	Caractéristiques des SOS	46
3.4.4	La 5G est-elle un system of systems ?	47
3.5	Ville intelligente	48
3.6	Conclusion	51
4	Simulation	52
4.1	Introduction	53
4.2	Agent et Système multi-agents	53
4.2.1	Agent	53
4.2.2	Système multi-agents	56
4.2.3	Pourquoi les SMA ?	58
4.3	Simulation	58
4.3.1	Modélisation et simulation à base d'agents	59
4.3.2	Choix de Netlogo	59
4.4	Mise en œuvre de la Ville intelligente	60
4.4.1	Scénario	60
4.4.2	Conditions	60
4.4.3	Paramètres de simulation	61
4.4.4	Présentation de la simulation	65
4.5	Mise en œuvre de l'Hôpital	71
4.5.1	Scénario	71
4.5.2	Conditions	71
4.5.3	Paramètres de simulation	72
4.5.4	Présentation de la simulation	75
4.6	Discussion	79
4.7	Conclusion	79
	Conclusion générale	80

Table des figures

1.1	Décomposition du territoire en cellules	4
1.2	Evolution des réseaux mobiles cellulaires	6
1.3	Handover intracellulaire	9
1.4	Handover intercellulaire	9
1.5	les différentes applications de la 5G	11
1.6	les différentes exigences de la 5G	13
1.7	l'internet des objets	19
1.8	les dimensions de l'IoT	20
1.9	Architecture d'une plateforme IoT	21
1.10	les différents composants d'un système IOT	22
1.11	Illustration d'un MANET	23
1.12	Illustration d'un VANET	23
2.1	L'utilisation du spectre en téléphonie mobile	30
2.2	Exemple d'un réseau d'accès radio ultra-dense composé d'une macrocellule et de plusieurs petites cellules	32
2.3	exemple d'utilisation d'une antenne à formation de faisceau utilisée pour connecter des points d'accès Wi-Fi	34
3.1	Protocoles de communication	44
3.2	Au coeur de la ville intelligente	49
4.1	Architecture d'un agent	54
4.2	Système multi-agents	56
4.3	Interface de simulation de la ville intelligente	66
4.4	Représentation du fonctionnement du bouton move (choix : personne) . . .	67
4.5	Représentation du fonctionnement du bouton move (choix : docteur) . . .	67

4.6	Représentation du fonctionnement du bouton stationner	68
4.7	Représentation du fonctionnement du bouton stationnervoiture	68
4.8	Représentation du fonctionnement du bouton allumer	69
4.9	Représentation du fonctionnement du bouton eteindre	69
4.10	Représentation du fonctionnement du bouton sécurité	70
4.11	Représentation du fonctionnement du bouton activer	70
4.12	Interface de simulation de l'hôpital	75
4.13	Représentation du fonctionnement du bouton move-doctor	76
4.14	Représentation du fonctionnement du bouton move-personne	76
4.15	Représentation du fonctionnement du bouton chauffer	77
4.16	Représentation du fonctionnement du bouton climatiser	77
4.17	Représentation du fonctionnement du bouton sécurité	78
4.18	Représentation du fonctionnement du bouton go.	78

Liste des tableaux

1.1	Comparaison entre les performances de la 4G et de la 5G	15
2.1	Caractéristiques des différents types de cellules[43]	33
4.1	Comparaison entre système d’agents cognitifs et système d’agents réactifs .	58
4.2	Propriétés des agents de la ville intelligente	62
4.3	Propriétés des agents de l’hôpital	73

Liste des abréviations

1G	Première génération
2G	Deuxième génération
3G	Troisième génération
3GPP	3rd Generation Partnership Project
4G	Quatrième génération
5G	Cinquième génération
6LoWPAN	IPv6 Low power Wireless Personal Area Networks
ANFR	Agence nationale des fréquences
ANT	Advanced and Adaptive Network Technology
API	Application Programming Interface
ARCEP	Autorité de Régulation des Communications Électroniques et des Postes
BACNet	Building Automation and Controls Network
BER	Bit Error Rate
BSS	Basic Service Set
eMBB	enhanced Mobile Broad Band
CIRC	Centre International de Recherche sur le Cancer
CMR	Conférence Mondiale des Radiocommunications
DNP3	Distributed Network Protocol 3
ECC	Electronic Communications Committe
FDD	Frequency Division Duplexing
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FTP	File Transfert Protocol
FTPS	File Transfert Protocol Secure
GPS	Global Positioning System
GSM	Global System for Mobile communication
GPRS	General Packet Radio Services

HART	Highway Addressable Remote Transducer Protocol
HD	High Definition
HTTP	HyperText Transport Protocol
HTTPS	HyperText Transport Protocol Secured
I2I	Infrastructure-to-Infrastructure
I2V	Infrastructure-to-Véhicule
IBSS	Independent Basic Service Set
IdO	Internet des Objets
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IMT	International Mobile Telecommunications
IoT	Internet of Things
IP	Internet Protocol
IPSec	Internet Protocol Security
IPSO	IP for Smart Objects
IPv4	Internet Protocol version 4
IPv6	Internet Protocol version 6
ISM	Industriel, Scientifique et Médical
LoRa	Long Range
LoRaWAN	Long Range Wide Area Network
LPWAN	Low Power Wide Area Networks
LTE	Long Term Evolution
M2M	Machine-to-Machine
MAC	Media Access Control
MANET	Mobile ad-hoc Network
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MMS	Multimedia Message Service
mMTC	massive Machine Time Communication
MQTT	Message Queuing Telemetry Transport
NAT	Network Address Translation
NB-IoT	Narrow Band-Internet of Things
NFV	Network function virtualisation
NR	New Radio
NSA	Non-Standalone
OBU	On-Board Unit

OFCOM	Office Fédéral de la communication
OMS	Organisation Mondiale de la Santé
OPC	Open Platform Communications
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
RCsF	Réseaux de Capteurs sans Fil
RIR	Registres Internet Régionaux
RSS	Received Signal Strength
SA	Standalone
SDR	Software-Defined Radio
SMA	Système Multi-Agents
SMS	Short Message System
SNMP	Simple Network Management Protocol
SoS	System of Systems
TCP	Transmission Control Protocol
TDD	Time Division Duplexing
UIT	Union internationale des télécommunications
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
uRLLC	ultra Reliable Low latency Communication
V2I	Véhicule-to-Infrastructure
V2N	Véhicule-to-Network
V2P	Véhicule-to-Personne
V2V	Véhicule-to-Véhicule
VANET	véhicule ad-hoc Network
VPN	Virtual Private Network
WPAN	Wireless Personal Area Networks
WISA	Wireless Interface for Sensor and Actuators

Introduction générale

Ces dernières années, nous assistons à un développement exponentiel de nouvelles applications et technologies dans les domaines de la santé, des médias, de l'industrie, du transport, de l'énergie. . . Cette évolution va de pair avec l'apparition de nouveaux services liés à une multiplication des objets connectés. Cette augmentation nécessite de nombreux progrès sur les systèmes de télécommunications mobiles vu la surcharge du spectre de fréquence du réseau 4G. Pour cela une nouvelle révolution dénommée 5G s'annonce.

Dans l'univers de la téléphonie mobile, la 5G se définit par la cinquième génération des standards mis en place à échelle mondiale. Sous cette définition se cachent une batterie de technologies avancées et des infrastructures capables d'assurer le transfert des données à un très haut débit pour un temps de latence ultra-court. Le but est effectivement de connecter non seulement les smartphones et les tablettes mais plus globalement l'ensemble des objets. Et c'est ici qu'on parle de l'internet des objets, un concept qui est apparu autour des années 2000 et qui a réellement fait son entrée dans le monde des affaires qu'en 2010. Actuellement, 12% des entreprises ont investi dans une solution IoT et il est à prévoir que d'ici deux à cinq ans, ce taux d'adoption ira jusqu'à 24%.

L'IoT est aujourd'hui devenu une technologie habilitante clé qui couvre plusieurs domaines technologiques, de la détection et traitement des données à l'exécution d'actions et tâches à distance en passant par la mise en réseau et à l'analyse des données. Ses applications sont également nombreuses allant de la sécurité domestique, de l'automatisation d'usine à la prestation de soin de santé à la conduite autonome et à la conception de villes intelligentes, un sujet qui nous intéresse dans notre projet.

L'objectif de notre projet est de faire une étude sur la 5G et les innovations qu'elle apporte dans le fonctionnement des réseaux mobiles pour permettre une amélioration

des communications, montrer sa puissance de connecté plusieurs agents (système multi-agents) et de s'intégrer aux applications de l'IoT et enfin faire la simulation d'une ville intelligente.

Organisation du mémoire

Ce mémoire est structuré comme suit :

Dans le **premier chapitre** nous allons aborder le concept cellulaire, les principes de base de la nouvelle génération 5G et un aperçu général sur l'internet des objets.

Dans le **deuxième chapitre** nous allons présenter une description détaillée des défis de la 5G et les technologies que cette dernière devra combiner afin d'avoir un réseau mobile qui pourra satisfaire aux attentes.

Dans le **troisième chapitre** nous allons exposer les protocoles de communication utilisés dans l'IoT et le concept de *System of Systems*.

Le **quatrième chapitre** est consacré pour détailler les systèmes multi-agent et à la simulation de notre scénario *SMART CITY*.

Enfin, nous concluons ce travail par une conclusion générale et quelques perspectives.

Chapitre 1

les réseaux cellulaires

1.1 Introduction

Depuis plusieurs années le développement des réseaux mobiles n'a pas cessé d'accroître, plusieurs générations ont vu le jour (1G, 2G, 3G, 4G, 5G) et connues une évolution remarquable, en apportant un débit exceptionnel qui ne cesse d'augmenter et une bande passante de plus en plus large.

Dans ce contexte, la première partie de ce chapitre sera consacré à la description du concept cellulaire et l'objectif de la 5G face aux précédentes générations des réseaux mobiles. Dans la seconde partie nous allons abordé le sujet de l'internet des objets et la nouvelle technologie des véhicule autonome.

1.2 Définition du concept cellulaire

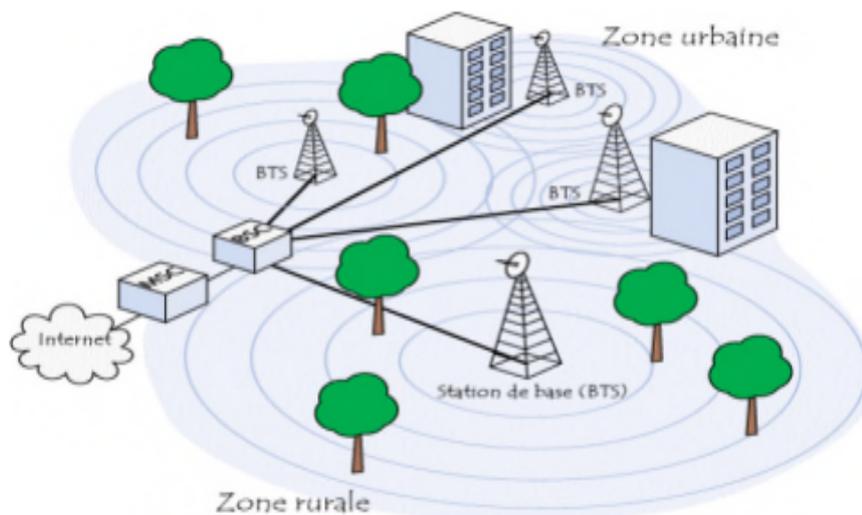


FIGURE 1.1 – Décomposition du territoire en cellules

Le réseau cellulaire est un réseau de communications spécialement destiné aux équipements mobiles. Il permet la communication entre ces unités mobiles ainsi qu'avec l'ensemble des abonnés. L'onde radio dans le cas d'un réseau cellulaire est le lien entre le mobile et l'infrastructure de l'émetteur[1]. Ce dernier se base sur le concept cellulaire, le principe de ce système est de diviser un territoire en petites zones appelées cellules et de partager les fréquences radio entre celle-ci. Ainsi chaque cellule est constituée d'une station radio ou une station de base (reliée au Réseau Téléphonique Commuté, RTC) à

laquelle une ressource radio est associée (une fréquence, un code . . .) qui ne pourra être réutilisée que par une cellule située suffisamment loin afin d'éviter tout conflit intercellulaire dans l'utilisation de la ressource. Conceptuellement, si une cellule permet d'écouter un certain nombre d'appels simultanés, le nombre total d'appels pouvant être supportés par le réseau peut être contrôlé en dimensionnant les cellules selon des tailles plus ou moins importantes[2, 3].

une cellule se caractérise par :

- Sa puissance d'émission nominale ce qui se traduit par une zone de couverture à l'intérieur de laquelle le niveau du champ électrique est supérieur à un seuil déterminé.
- la fréquence de porteuse utilisée pour l'émission radio-électrique.
- le réseau auquel elle est interconnectée.

Il faut noter que la taille des cellules n'est pas la même sur tout le territoire.

En effet, celle-ci dépend :

- du nombre d'utilisateurs potentiels dans la zone.
- de la configuration du terrain (relief géographique, présence d'immeubles, ...).
- de la nature des constructions (maisons, buildings, immeubles en béton, ...) .
- de la localisation (rurale, suburbaine ou urbaine) et donc de la densité des constructions.

1.3 historique des réseaux mobiles

Un réseau mobile est un réseau cellulaire qui permet l'utilisation simultanée de téléphones sans fil, immobiles ou en mouvement, y compris lors de déplacements à grande vitesse et sur grande distance. Depuis 30 ans, plusieurs générations technologiques se succèdent permettant de passer d'un service de communication téléphonique de la voix et transmission de message texte, à des services de données, l'internet mobile, le très haut débit et les objets connectés : G1, GSM/2G, 3G/UMTS, 4G/LTE [4].

la figure 1.2 [4] représente l'évolution des réseaux mobiles cellulaires.

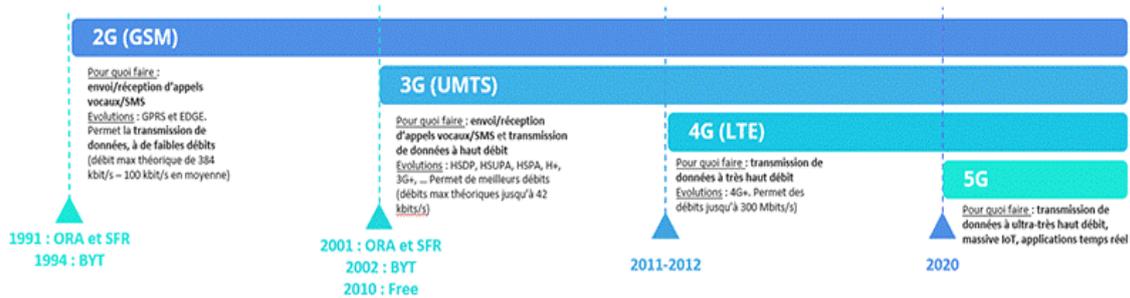


FIGURE 1.2 – Evolution des réseaux mobiles cellulaires

1.3.1 La première génération 1G

La 1G qui est la première génération de réseaux mobiles est uniquement dédiée aux appels vocaux. Elle repose sur une technologie dite « analogique ». Ceci à la différence des générations suivantes de téléphonie mobile (2G, 3G, 4G, 5G) qui elles exploitent la technologie « numérique » [5].

1.3.2 La deuxième génération 2G/GSM

La deuxième génération (2G) repose sur une technologie numérique qui a été développée à la fin des années 1990. L'un de ses standards qui a rencontré le plus large succès est le GSM (Global System for Mobile communication), idéal pour la communication de type voix où les ressources ne seront allouées que pour la durée de la conversation et qui permet également la transmission des données, notamment des messages courts (SMS) et des messages multimédias (MMS), et une itinérance international est assurée[28].

1.3.3 La troisième génération 3G/UMTS

La troisième génération de normes de téléphonie mobile (UMTS : Universal Mobile Telecommunications System) propose d'échanger à 1,9 Mégabits par seconde, soit environ 5 fois plus rapidement que la génération précédente[6].

1.3.4 La quatrième génération 4G/LTE

Avec la quatrième génération (LTE : Long Term Evolution), l'échange de données peut dépasser les 100 Mégabits par seconde, si ce n'est plus, et ainsi atteindre le très haut

débit mobile. En réalité, la bande passante s'avère toutefois partagée entre les utilisateurs. Moins il y a d'utilisateurs utilisant le réseau et plus le débit est donc élevé[6].

1.4 Vers la nouvelle génération des réseaux mobiles : 5G

1.4.1 Historique

Chaque génération de réseau a une durée de vie d'environ 20 ans. Les travaux sur la 4G ont débuté en 2003 pour un lancement en 2010 et jusqu'en 2030. De son côté, la 5G est en réflexion depuis 2012, pour un lancement commercial en 2020[7]. En France, le déploiement du réseau 5G a commencé à la fin de l'année 2020 et se poursuit dans la métropole. Désormais, les 4 opérateurs majeurs (Free Mobile, Orange, Bouygues Telecom et SFR) rivalisent dans le secteur du très haut débit mobile[8].

1.4.2 Présentation

Les fichiers que l'on télécharge sont de plus en plus lourds. La qualité des vidéos et du son dont on profite ne cesse d'augmenter, ce qui se traduit par un nombre de Go pour un élément toujours plus grand. De fait, pour que les téléchargements ne deviennent pas trop long, il y a nécessité de proposer des débits plus rapides. D'où l'apparition d'une nouvelle génération la 5G. La nouvelle génération des standards de la téléphonie mobile 5G promet de révolutionner la manière dont le monde communique, Une plus grande bande passante et des temps de latence extrêmement faibles permettront de développer de nouveaux services et l'amélioration des systèmes existants.

1.4.3 Mobilité en 5G

La gestion de la mobilité regroupe deux composantes : la gestion de la localisation (location management) et la gestion de la relève (handover management)

1.4.3.1 Gestion de la localisation

La gestion de la localisation permet au réseau d'accès d'identifier le point d'accès courant du nœud mobile afin de lui acheminer ses données. Elle englobe les opérations

d'enregistrement de la localisation (location registration), de mise à jour de localisation (location update), et de livraison de données (data delivery). L'enregistrement de la localisation permet au nœud mobile lors de sa première attache au réseau d'accès, de s'identifier en vue d'accéder aux services disponibles. Au cours de ses déplacements, le nœud mobile procède aux mises à jour périodiques de localisation afin que le réseau puisse retrouver à tout moment sa position courante. L'acheminement des données fait référence à la capacité du réseau à trouver la position courante du nœud afin de lui transmettre ses données [34].

1.4.3.2 Gestion de la relève (Handover)

Le handover est le processus qui permet à un nœud mobile de changer son point d'attachement. Un nœud mobile connecté sur un réseau peut avoir le besoin de se connecter à une autre cellule soit du même réseau, soit d'un nouveau réseau, dans le but d'améliorer sa qualité de service. En général, deux types de handover sont utilisés dans les systèmes cellulaires à savoir intra et inter cellulaire[44].

- Handover intracellulaire : Le handover intracellulaire est le transfert d'utilisateurs vers un autre meilleur canal de fréquence lorsque la qualité du canal utilisé devient trop faible pour supporter la connexion actuelle du mobile, et peut se situer entre les secteurs d'une cellule lorsqu'un utilisateur se déplace d'un secteur à un autre dans la même cellule, comme illustré par la figure1.3.

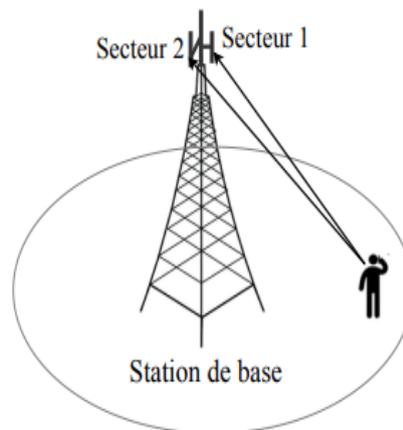


FIGURE 1.3 – Handover intracellulaire

- Handover intercellulaire : Le transfert intercellulaire est le déplacement de l'utilisateur de la couverture radio d'une station de base (la station de base servie) à la couverture radio d'une autre station de base, comme le montre la figure 1.4

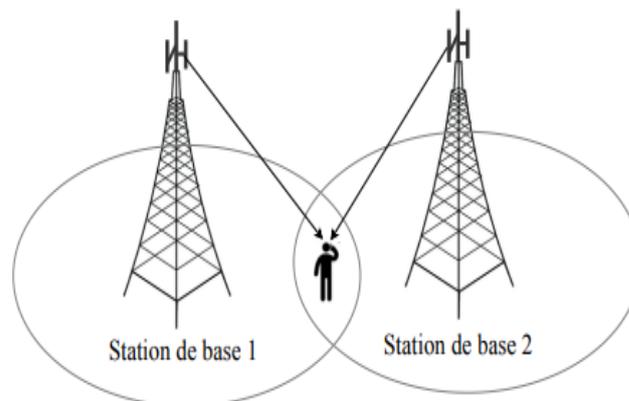


FIGURE 1.4 – Handover intercellulaire

La procédure du Handover comprend trois phases [49] :

- Phase de découverte : il s’agit d’une phase de collecte d’informations sur le mobile et sur les différents réseaux d’accès, telles que la force du signal reçu (RSS : Received Signal Strength), le taux d’erreurs binaires (BER : Bit Error Rate), la distance entre le mobile et la station de base, etc. Les informations récupérées serviront plus tard dans la phase de prise de décision du handover.
- Phase de prise décision : cette phase est décomposée à son tour en deux étapes.
 - L’étape d’initiation du handover, qui a pour but de déterminer s’il y a nécessité d’effectuer un handover.
 - L’étape de sélection du réseau d’accès, qui permet de choisir le réseau qui convient le mieux parmi les réseaux d’accès disponibles.
- Phase d’exécution : il s’agit de l’établissement de la connexion avec le nouveau lien. Trois cas sont possibles selon que l’ancien lien est libéré avant (Hard Handover), pendant (Seamless Handover) ou après (Soft Handover) l’établissement du nouveau lien.

1.4.4 Objectifs de la 5G

1.4.4.1 Pourquoi la 5G ?

Le but est effectivement de connecter non seulement les Smartphones et les tablettes mais plus globalement l’ensemble des objets et de pouvoir prendre leur contrôle à distance. Or on estime qu’il y en a environ un million au kilomètre carré. Surtout le réseau 5G réduira considérablement les temps de latence à 1 ms contrairement aux 30-40 ms observés aujourd’hui. Seul un temps de latence extrêmement faible est donc acceptable pour le pilotage d’un drone ou d’une voiture connectée.

1.4.4.2 Catégories d’usages de la 5G

1. Cas d’utilisations : La 5G est la première génération de téléphonie mobile à être conçue pour des cas d’usage autres que la voix et la donnée. Les cas d’usage de la 5G se définissent selon les trois catégories suivantes[32] :
 - L’eMBB (enhanced Mobile Broad Band), c’est-à-dire des communications mobile ultra haut débit. Cet usage se trouve dans la continuité des précédentes générations de téléphonie mobile et permet de répondre à l’augmentation exponentielle

de l'utilisation des données mobiles. Les applications de cette catégorie sont typiquement des flux vidéo de qualité de plus en plus grande et aussi des applications de réalité virtuelle et augmentée. L'objectif est donc de pouvoir répondre à une demande toujours plus grande en termes de quantité de données et de vitesse de transfert.

- Le mMTC (massive Machine Time Communication), c'est-à-dire les communications entre objets. L'internet des objets rentre dans cette catégorie. Il s'agit dans cette catégorie de pouvoir gérer un nombre très important de connexions (jusqu'à un million par kilomètre carré). La quantité de données à transmettre par communication est en général limitée et la rapidité de transfert peu contraignante. Un domaine d'application typique est la ville intelligente avec des réseaux de capteurs pour gérer différents services.
- L'uRLLC (ultra Reliable Low latency Communication), c'est-à-dire les communications dites critiques, pour lesquelles la fiabilité et le temps de réponse sont primordiaux. L'application phare de cette catégorie est le véhicule autonome mais les communications des services de sécurité et d'urgence sont également concernées. Il ne doit pas y avoir d'échec ou de coupure de communication et la transmission doit être le plus rapide possible.

2. Domaines d'utilisation et Nouvelles applications : L'essor de la 5G permettra le déploiement massif de l'Internet des objets (IoT), et il peut être très bénéfique s'il est utilisé à des fins industrielles ou dans des applications liées à la santé.

Les différentes applications de la 5G sont illustrées par la figure 1.5 :



FIGURE 1.5 – les différentes applications de la 5G

- (a) Domaine de la santé : les performances de la 5G promettent des applications dans le domaine de la santé. Parmi les exemples cités, la téléconsultation permettrait la mise en relation d'un professionnel de santé et d'un patient. La télésurveillance a pour objectif de permettre à un médecin de collecter et analyser à distance les données de son patient, la téléchirurgie, grâce à laquelle des robots pourraient opérer des patients dans des salles d'opération entièrement automatisées[33].
- (b) Domaine de l'industrie : la 5G promet d'être un moteur de transformation numérique pour toute l'industrie (automobile, logistique, agriculture, etc.) avec les nouveaux usages qu'elle garantit et les perspectives innovantes qu'elle offre en termes de compétitivité. Voici quelques nouvelles opportunités industrielles offertes par la 5G[29] :
 - Suivi, pilotage et reconfiguration à distance de machines industrielles et de chaînes de production robotisées. Ces équipements peuvent être reconfigurés rapidement et facilement
 - Suivi logistique de bout en bout d'un très grand nombre de colis ou d'articles, notamment dans les grandes plateformes de tri (ex : ports, gares, aéroports, etc.).
 - Suivi précis des troupeaux dans les exploitations agricoles grâce à des capteurs sur le bétail.
- (c) Domaine du multimédia : grâce à la 5G on aura des vidéos de très haute qualité, des jeux en réseau en temps réel, des expériences immersives interactives, le streaming à la demande, les réseaux sociaux collaboratifs étendus.
- (d) Domaine des véhicules autonomes connectés : Le monde de l'automobile pourrait utiliser ces nouveaux réseaux pour permettre aux véhicules non seulement de prendre des décisions sans intervention humaine, mais aussi de communiquer entre eux avec des temps de réaction compatibles avec les exigences d'un déplacement à haute vitesse. Cette réalité est déjà possible avec la première flotte expérimentale de taxis 100% autonomes mise en service à Singapour par les sociétés nuTonomy et Grab2 [29].

1.4.5 Exigences de la 5G

La cinquième génération repose sur 8 exigences :

- Jusqu'à 10 Gbit/s de débit de données - > de 10 à 100 fois plus que les réseaux 4G
- 1 milliseconde de latence
- 1 000 fois plus de bande passante par unité de surface
- Jusqu'à 100 fois plus d'appareils connectés par unité de surface (par rapport à la 4G LTE)
- 99,999 % de disponibilité
- 100 % de couverture
- 90 % de réduction de la consommation d'énergie du réseau
- Jusqu'à 10 ans de durée de vie de la batterie pour les appareils IoT à faible consommation [9].

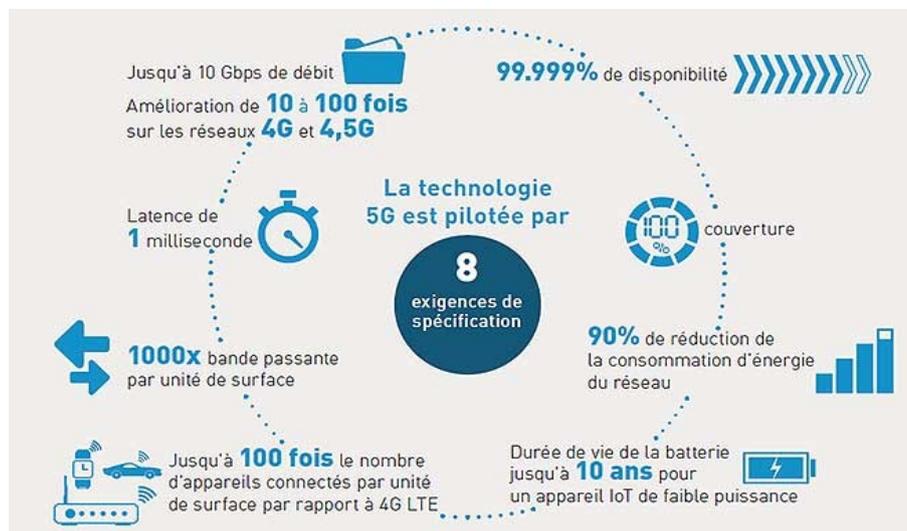


FIGURE 1.6 – les différentes exigences de la 5G

1.4.6 Avantages de la 5G

Pour comprendre l'intérêt de la 5G, il y a trois mots importants à retenir : débit, latence et densité[32].

1. Le débit : dans la continuité de réseaux actuels et pour faire face à la demande croissante de trafic, les réseaux 5G devront permettre d'atteindre des débits jusqu'à dix fois plus grands qu'en 4G.
2. La latence : le temps de réponse des réseaux 5G sera divisé par 10 pour permettre le développement de nouveaux usages comme la voiture autonome ou la télémédecine.

3. La densité : la 5G embarque l'internet des objets (IoT pour Internet of Things) et devra donc gérer des millions de connexion.

Néanmoins, pour que la 5G puisse atteindre ce niveau de performances, il faudra attendre que la bande des 26 GHz soit attribuée à la 5G

1.4.7 Dangers de la 5G

1.4.7.1 La 5G est-elle dangereuse pour la santé ?

Avec une transmission de données annoncée 100 fois plus rapide qu'avec la 4G actuelle, qui mise sur des fréquences de transmissions plus hautes (3-30 GHz), c'est peu dire que nous serons submergés de données, et donc d'ondes.

Le problème majeur vient de la portée plus courte de ces nouvelles ondes. Et qui dit portée plus courte, dit besoin accru d'antennes de transmission. Selon le reportage de Nouvo (RTS), qui cite l'OFCOM, ce sont plusieurs milliers d'antennes qui vont devoir être rajoutées en Suisse à l'infrastructure actuelle pour permettre la mise en place de la 5G, dont bon nombre de petites antennes-relai.

Cette prolifération d'antennes a provoqué une levée de boucliers de la part de nombreux scientifiques.

Plus de 200 scientifiques et médecins ont d'ailleurs demandé un moratoire sur la 5G. Risques élevés de cancers, dommages génétiques et désordres neurologiques sont notamment mis en avant par ces savants. L'association Robin des Toits considère même que nous allons tous devenir des rats de laboratoire, étant donné que l'impact de la 5G n'aura pas été mesuré et que celui-ci ne peut vraiment l'être qu'au bout de plusieurs années (mesure de l'augmentation des cancers dans un environnement 5G, par exemple). Le débat sur les dangers potentiels de la 5G sur la santé n'est pas nouveau. Il date même de septembre 2017, quand plus de 180 scientifiques et médecins de 37 pays ont demandé pour la première fois un moratoire sur le déploiement de la 5G, "jusqu'à ce que des études d'impact sanitaires et environnementales sérieuses et indépendantes aient été réalisées préalablement à toute mise sur le marché"[10].

Performances/Génération	4G	5G
1.Débit maximal (Gbit/s)	1	20
2.Débit aperçu par l'utilisateur	10	100
3.Efficacité spectrale	1x	3x
4.Vitesse (Km/h)	350	500
5.Latence (ms)	10	1
6.Nombres d'objets connectés sur une zone (Quantité d'objet/Km)	10^5	10^6
7.Efficacité énergétique du réseau	1x	100x
8.Débit sur une zone (Mbit/s/m)	0.1	10

TABLE 1.1 – Comparaison entre les performances de la 4G et de la 5G

1.4.7.2 La 5G est-elle néfaste pour l'environnement ?

« La consommation énergétique est susceptible d'augmenter de manière dramatique si la 5G est déployée de la même manière que la 4G », reconnaît lui-même l'équipementier télécom suédois Ericsson. « Un équipement 5G consomme 3 fois plus qu'un équipement 4G, et ajouter des équipements 5G aux sites existants (2G, 3G, 4G) conduira à doubler la consommation du site », met également en garde le spécialiste des énergies Jean-Marc Jancovici. « Cela revient à environ 10 TWh supplémentaires, soit une augmentation de 2% de la consommation d'électricité du pays », poursuit le spécialiste [11].

1.4.8 Différence entre la 4G et la 5G

Il n'y a pas de différence fondamentale en termes de codage du signal et de méthode de multiplexage¹⁹ entre l'interface radio 4G et 5G, qui utilise la modulation QAM et le multiplexage OFDMA de la 4G avec des paramètres optimisés. La radio 5G est une 4G améliorée, s'appuyant sur un cœur de réseau révolutionné à terme pour déployer une palette de service étendus et personnalisés[35] : La 5G va utiliser plus de fréquences et des fréquences différentes de la 4G. Elle va tout d'abord permettre de désengorger le réseau 4G, proche de la saturation, et une montée en débit significative. Grâce à des débits beaucoup plus élevés, une latence beaucoup plus faible et la possibilité de prendre en charge un plus grand nombre d'appareils, la 5G va aussi permettre, à termes, de développer des usages totalement différents de la 4G, comme la télémédecine, les véhicules autonomes, ou l'automatisation des usines.

Le tableau 1.1 résume les performances attendues de la 5G et celles qui sont actuellement disponibles avec la 4G [39]

1.4.9 5G SA et 5G NSA

Le déploiement de la 5G peut se faire en plusieurs phases. Certains pays ont commencé à déployer leur réseau en utilisant la 5G NSA, ou 5G Non-standalone. Il s'agit de continuer d'utiliser le cœur de réseau 4G LTE de l'opérateur tout en ajoutant petit à petit des antennes 5G, et permettre notamment l'utilisation de hautes fréquences en 5G NR. Par opposition, la 5G SA, ou 5G Standalone, représente l'idéale du déploiement de la 5G, ou un appareil peut utiliser les technologies 5G aussi bien sur les basses et les hautes fréquences, avec un cœur de réseau entièrement migré vers la 5G NR. Dans cette situation, l'appareil ne se repose plus sur les technologies de la 4G LTE. Cela demande des investissements bien plus conséquents, et ne sera donc disponible qu'à long terme[12].

1.4.10 L'IPv4 ou l'IPv6 pour la 5G ?

Avec l'arrivée prochaine des forfaits 5G, du tout connecté et de l'Internet des objets, les demandes en adresses IP vont de surcroît encore exploser. Sur les plus de 4 milliards d'adresses IP disponibles, toutes ne sont en outre pas utilisables, puisque certaines ne peuvent pas être utilisées en raison de contraintes liées au découpage en sous-réseaux de l'Internet. Lors des débuts de l'Internet mondial, l'économie d'adresses IP n'était pas prise en compte, puisque certaines entreprises se sont vu attribuer des lots de 16 millions d'adresses. Cela a participé, à son échelle, à la pénurie d'adresses IPv4. Pour palier à cette pénurie, il a fallu déployer des solutions. Les RIR, pour Registres Internet Régionaux, ont par exemple mis en place des politiques d'assignation plus sévères, qui prennent en compte les besoins réels. Le NAT, pour Network Address Translation, est une autre technologie qui a notamment été développée pour soulager les problèmes de pénurie d'adresses IPv4. Il s'agit d'une technique consistant à traduire des adresses IP privées, n'accédant pas directement à l'Internet, en une seule adresse IP publique, qui peut communiquer avec l'Internet mondial. Concrètement, cela permet aux ordinateurs d'un réseau intranet de ne pas avoir d'adresse IPv4 publique, et donc d'en économiser un nombre non-négligeable. Une autre solution, basée sur le volontariat, a été de récupérer les blocs assignés de manière trop généreuse aux débuts de l'Internet. D'autres solutions très techniques ont été déployées, mais certains redoutent tout de même la mise en place d'un marché noir, entre clients, de revente d'adresses IP ou de blocs d'adresses IP. Pour éviter cela, un nouveau protocole, l'IPv6, doit faire son apparition[13].

Les adresses IPv6 apportent différents types d'avantages :

- Une norme mieux sécurisée : Il faut se souvenir que l'IPv4 est une norme très ancienne. À cette époque, les aspects de sécurité n'étaient pas aussi importants, puisque les menaces étaient bien plus modérées. Les mécanismes de sécurité, comme IPSec, ont ainsi été rajoutés à la norme. Avec l'IPv4, IPSec est donc optionnel. Ce mécanisme sert à protéger les paquets, grâce à différentes méthodes comme le chiffrement, l'intégrité des données ou encore l'authentification par les pairs. Dans la norme IPv6, IPSec a été directement implémenté. Cela veut dire qu'il ne s'avère pas nécessaire de le configurer pour qu'il fonctionne.
- L'autoconfiguration des adresses IPv6 : Un autre avantage de ce nouveau protocole se nomme l'autoconfiguration sans état des adresses IPv6. Cela permet d'éviter les problèmes de configuration que pouvaient comporter le déploiement des réseaux IPv4. Désormais, chaque appareil est capable de déterminer lui-même son adresse, sans que l'administrateur n'ait à procéder à une configuration manuelle. Si cet avantage reste plutôt technique, il faut retenir que la configuration des réseaux est plus simple avec IPv6 qu'avec IPv4.
- Des en-têtes simplifiées : Les en-têtes IPv6 ont de surcroît été simplifiées. Grâce à la multidiffusion, qui est une fonctionnalité optionnelle dans IPv4, il est possible de transmettre un paquet à plusieurs destinataires d'un coup. Cette fonctionnalité est, elle aussi, incluse de base dans IPv6. On peut donc dire que si la plupart des avantages de l'IPv6 restent techniques et adressés aux professionnels du secteur des réseaux, l'arrivée de cette nouvelle norme devrait premièrement régler le problème de la pénurie des adresses IPv4. Pour les consommateurs qui souhaitent utiliser un VPN, il faudra en sélectionner un qui est compatible avec l'IPv6.

Le principal inconvénient de l'IPv6 :

Le seul véritable désavantage de l'IPv6 est qu'il n'est pas compatible avec l'IPv4. Cela pose un réel enjeu, puisque l'Internet mondial ne peut pas se permettre d'être séparé en deux le temps que la transition soit effectuée.

Comment va se passer la transition d'IPv4 à IPv6 ?

Il faut savoir qu'IPv6 possède un énorme inconvénient. Il s'agit du fait que les adresses IPv4 et IPv6 ne sont pas compatibles. Un appareil disposant d'une adresse IPv6 ne pourra donc pas communiquer du tout avec un autre qui n'utilise qu'une adresse IPv4. Il s'avère

donc primordial qu'une transition globale soit effectuée. Pendant la phase de transition d'IPv4 à IPv6, il faut obligatoirement trouver un moyen permettant une communication entre les hôtes disposant d'adresses IPv6 et ceux ayant des adresses IPv4. Des chercheurs ont détaillé ces solutions dans une étude comparative en 2017. Une première approche existe, qui s'appelle la traduction de protocole. Elle consiste à traduire une adresse IPv4 en IPv6, et vice-versa, afin de la rendre compréhensible. Cette technique peut servir dans des cas particuliers, mais elle se heurte très vite à des problèmes d'échelle. Une seconde approche s'appelle la double pile. Cette technique consiste à équiper tous les appareils connectés au réseau à la fois d'une pile de protocoles IPv4 et d'une autre IPv6. De cette façon, tous les appareils peuvent communiquer entre eux. Cette technique est simple à mettre en place et n'implique pas de conversion de paquets. Elle permet de surcroît d'accéder à la fois à des machines IPv4 et IPv6 sans nécessité de mécanismes supplémentaires. Cependant, cette technique ne résout pas la pénurie en adresses IP, et elle accroît la consommation en ressources des appareils informatiques. Elle augmente en outre la complexité dans certains cas, comme les applications qui fonctionnent différemment selon le protocole, ou au niveau des politiques de sécurité pour IPv4 et IPv6. Enfin, il existe des mécanismes de tunneling, qui consistent à encapsuler un protocole dans un autre protocole, qui ont chacun des avantages et des inconvénients.

1.5 Internet of things

1.5.1 Définition

L'Internet des objets est composé de différents types d'appareils connectés à Internet. Ces équipements peuvent être très variés. On y retrouve les tablettes, les montres, les smartphones, les voitures voire des feux rouges régulant la circulation dans les villes intelligentes (smart city)[14].

IoT Un réseau d'éléments identifiables de manière unique qui communiquent sans interaction humaine à l'aide de la connectivité IP[36].

Grâce à l'IoT, l'utilisateur peut agir en temps réel sur son environnement de manière manuelle ou automatisée, pour faciliter un tas de tâches tel l'optimisation de la production, contrôle des machines, ou encore l'optimisation de chaînes logistiques en temps réels.



FIGURE 1.7 – l'internet des objets

Citons ci dessous quelques exemples d'application de l'IoT[48] :

La maison intelligente ou Smart home : en incluant la domotique, la maison connectée est un système intelligent conçu pour optimiser et automatiser des fonctions techniques et de communication de la maison . Les appareils électriques sont reliés entre eux et peuvent interagir pour réduire la consommation d'énergie en chauffage, eau chaude, climatisation ou éclairage, tout en assurant un confort total à domicile. La maison intelligente peut être simplement gérée par un téléphone portable et ore l'avantage de s'adapter aux besoins et au mode de vie des individus. La domotique c'est aussi une aide précieuse pour les personnes handicapées et les personnes non autonomes.

La ville intelligente ou Smart city : c'est l'extension du concept de la ville intelligente appliquée dans toute une ville. Elle permet une gestion plus efficace au bénéfice des usagers et de la collectivité. Ces applications les plus courantes concernent le service public, comme les capteurs de présence dans les parkings pour indiquer la disponibilités des places libres, les conteneurs poubelles qui indiquent leur taux de remplissage, ou encore les capteurs indiquant la congestion des tracs routiers.

L'usine intelligente ou Smart factory : il est possible de connecter l'ensemble des ressources d'une entreprise ou usine (personnes, logiciels, équipements, produits, etc.), permettant ainsi de prévenir diverses problématiques pouvant entraîner un arrêt de la production, notamment les pannes d'équipements ou les non-conformités

1.5.2 Dimensions de l'IoT

L'IoT introduira une nouvelle dimension aux technologies de l'information et de la communication qui permettent aux personnes de se connecter à n'importe quel moment, depuis n'importe quelle place, à n'importe quel objet [15].

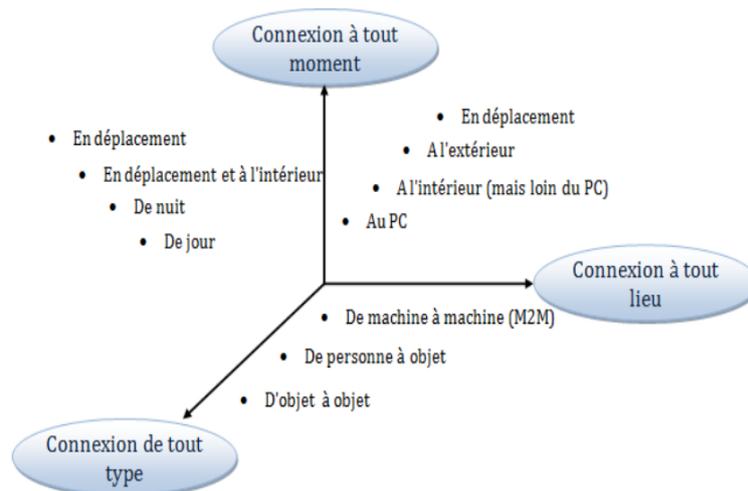


FIGURE 1.8 – les dimensions de l'IoT

1.5.3 Architecture de l'IoT

L'architecture d'une solution IoT varie d'un système à l'autre en se basant sur le type de la solution à mettre en place. L'architecture la plus élémentaire est une architecture à trois couches :

- La couche perception possède des capteurs et actionneurs qui détectent et recueillent des informations sur l'environnement.
- La couche réseau est responsable de la connexion, du transport et du traitement des données issues des capteurs et actionneurs.
- La couche application est chargée de fournir à l'utilisateur des services spécifiques et applications intelligentes [36].

La figure 1.9 représente l'architecture d'une plateforme IoT.

1.5.4 Composants d'un système d'IoT

un système IoT est composé :

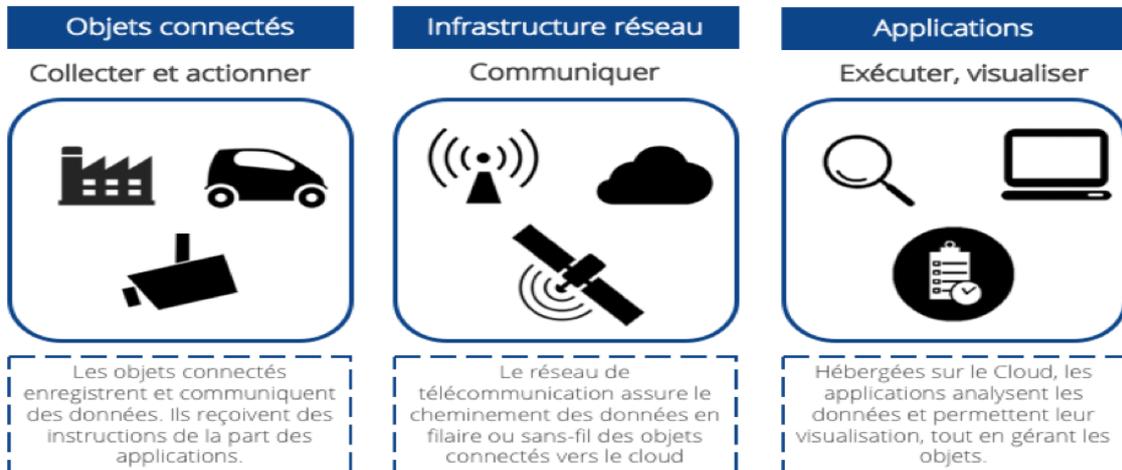


FIGURE 1.9 – Architecture d'une plateforme IoT

- d'un réseau d'objets connectés.
- de passerelles et réseaux de communication sans fil (Wifi et Bluetooth notamment).
- de protocoles réseau (Sigfox et LoRa).
- d'API et de plateformes pour collecter et traiter les données.
- d'hébergeur ou de fournisseurs de cloud computing pour stocker les informations.
- de logiciels et applications pour visualiser, trier et afficher plus facilement les données.
- d'une informatique en périphérie (Edge Computing) pour déplacer si nécessaire le traitement et l'analyse de données près de l'utilisateur final afin de réduire toute latence [14].

La figure 1.10 illustre les différents composants d'un système Iot :

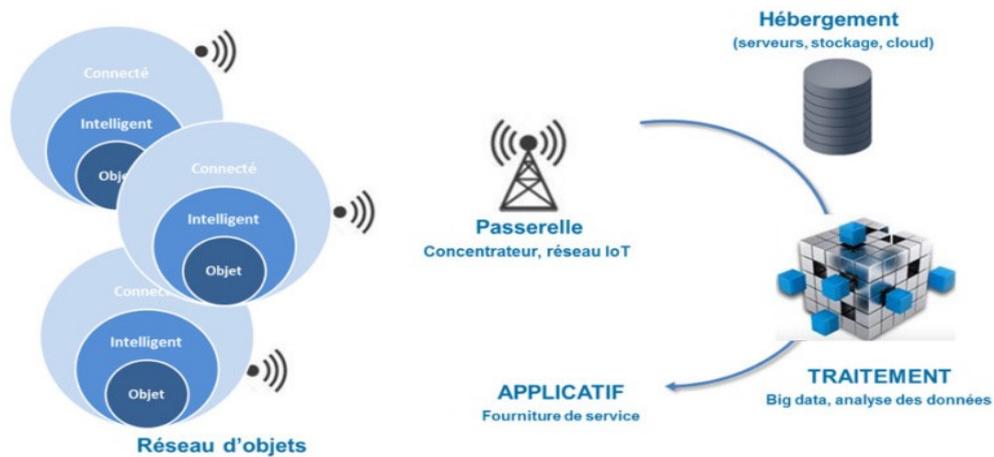


FIGURE 1.10 – les différents composants d'un système IOT

1.6 Réseaux véhiculaires

Le véhicule connecté est une technologie de l'internet des objets (IoT) aux vastes implications.

1.6.1 Présentation

Un réseau véhiculaire mobile est un réseau de type ad-hoc. Un réseau ad-hoc est capable de se mettre en place de façon autonome, c'est-à-dire sans l'aide d'aucune infrastructure préparée à l'avance[45]. Les communications se font alors directement entre les différents nœuds du réseau. On distingue deux types de réseaux mobiles ad-hoc : les Mobile ad-hoc Networks (MANETs), et les véhicule ad-hoc Networks (VANETs). Les MANETs sont les plus connus. Ils sont utilisés pour établir des communications de façon rapide et autonome dans des zones démunies de toute couverture de réseau (comme par exemple, en cas de catastrophe naturelle ou dans une zone de combats). (Leurs nœuds mobiles, aussi appelés On-Board Unit (OBU), sont embarqués dans des véhicules qui se déplacent au sein d'un réseau routier)[46].

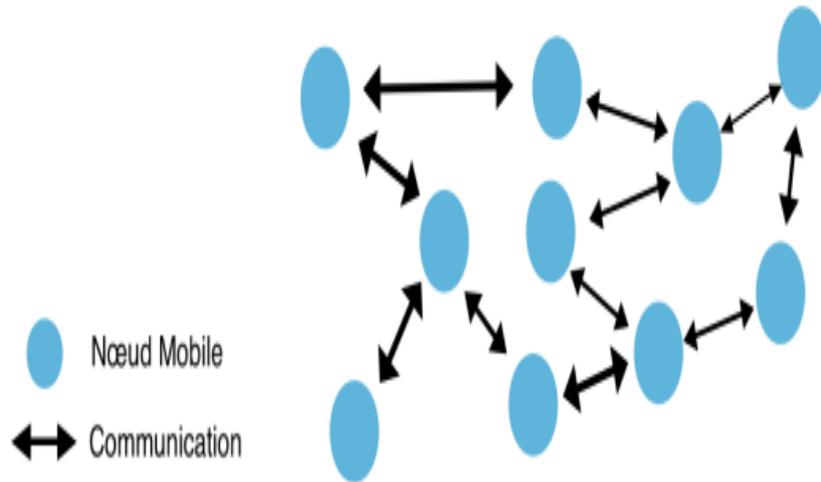


FIGURE 1.11 – Illustration d'un MANET

Les VANETs sont utilisés pour établir des communications entre tous les véhicules qui circulent sur les routes. Mais, les VANETs ne sont pas des réseaux purement ad-hoc. Ils peuvent utiliser, de façon opportuniste, les communications avec des infrastructures, permettant ainsi un accès à d'autres réseaux et donc aussi, à Internet. Ils peuvent utiliser les communications issues des réseaux mobiles, comme par exemple la 3e Génération (3G), la 4e Génération (4G)[45].

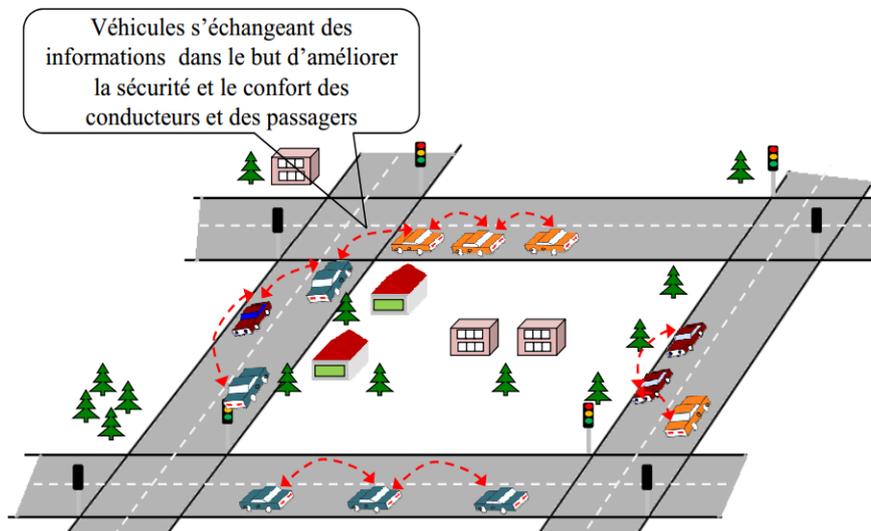


FIGURE 1.12 – Illustration d'un VANET

1.6.2 Caractéristiques

Les réseaux véhiculaires mobiles ont les caractéristiques intrinsèques suivantes[45] :

- Ils sont très dynamiques. En effet, le réseau doit pouvoir gérer des véhicules allant de 0 à 160 km/h.
- Leurs environnements sont très variés. L’environnement peut être une route, une autoroute, ou une ville (beaucoup plus complexe).
- Leur mobilité peut être prédite et modélisée. En effet, la circulation sur une route ou une autoroute est facilement prévisible, car le véhicule doit en général rester sur la route.
- Ils n’ont pas de problème d’énergie ou de stockage. Les équipements du réseau étant installés dans le véhicule, il n’y a pas de problème lié à la durée de vie du réseau.

1.6.3 Types de communication

Pour permettre l’établissement de communications entre les différents composants intégrés aux réseaux véhiculaires, la normalisation de nombreux types de communication est nécessaire [41] :

- Véhicule to Véhicule (V2V, Véhicule-to-Véhicule) : il s’agit de communications directes, sans fil, entre véhicules.
- Véhicule-à-Réseau (V2N, Véhicule-to-Network) : il s’agit de communications entre un véhicule et un équipement appartenant au réseau de communication cellulaire, les BS notamment.
- Véhicule to Infrastructure (V2I, Véhicule to infrastructure) ou Infrastructure to Véhicule (I2V, Infrastructure to Véhicule) : il s’agit de communications entre un véhicule et un équipement appartenant à l’infrastructure de bord de route : RSU, éclairage routier, panneau de signalisation, radar, arrêt de bus, etc.
- Véhicule-à-Personne (V2P, Véhicule-to-Person) : il s’agit de communications entre un véhicule et un usager de la route non motorisé : piéton, cycliste, etc.
- Infrastructure-à-Infrastructure (I2I, Infrastructure-to-Infrastructure) : il s’agit de communications filaires ou sans fil entre deux équipements réseau (BS, RSU (équipement de bord de route)).

1.7 Conclusion

La 5G est la prochaine phase des technologies mobiles offrant une bande passante élevée, une couverture plus étendue et une latence ultra-faible .Elle rendra possible le déploiement de nouveaux services, de nouveaux cas d'utilisation tels que l'Internet-des-objets (IoT), la réalité augmentée, la réalité virtuelle, les réseaux de villes intelligentes, les véhicules autonomes, et l'automatisation industrielle.

Dans ce premier chapitre, nous avons donné un aperçu sur le concept cellulaire, la cinquième génération et l'IoT. Dans le chapitre suivant nous allons détailler les défis et les technologies sur lesquelles elle repose.

Chapitre 2

Défis et Technologies

2.1 Introduction

Face à l'ensemble des exigences citées dans le premier chapitre, la future génération des systèmes de télécommunications mobiles devra utiliser des technologies plus performantes pour relever le défi.

Dans ce chapitre nous allons présenter les défis de la 5G et les technologies que cette dernière devra combiner afin d'avoir un réseau mobile qui pourra satisfaire aux attentes.

2.2 Défis de la 5G

La conception de réseaux 5G présente de nombreux défis. Comme pour toute nouvelle technologie sans fil, il faudra du temps avant que le marché ne comprenne pleinement les obstacles et les possibilités que la 5G apportera. Nous avons relevé cinq défis :

2.2.1 De nouveaux modèles économiques centrés sur les marchés verticaux

Les technologies 3G et, surtout, 4G visaient principalement l'internet mobile à très haut débit. La 5G continuera à viser cet usage, mais souhaite s'adresser également aux marchés dits « verticaux », caractérisés par plusieurs segments, dont notamment :

- les véhicules connectés pour garantir la sécurité via des communications entre véhicules et entre véhicules et infrastructures .
- l'industrie du futur .
- les villes intelligentes avec des besoins au niveau des transports publics (similaires aux besoins des véhicules connectés), de l'environnement, de la gestion des bâtiments et de la consommation énergétique.
- la médecine et la chirurgie assistée à distance .
- le suivi et la gestion de flux « smartgrids » (électricité, gaz, eau, etc..) [39].

2.2.1.1 Secteur automobile

La voiture est un moyen de transport très répandu et la sécurité associée à la conduite est un élément primordial ; l'erreur humaine est la principale cause d'accidents dans les transports. Le secteur des transports souhaite utiliser les innovations technologiques pour

répondre à cette problématique et pour rendre les transports toujours plus efficaces, durables et sûrs.

La 5G joue un rôle dans plusieurs domaines afin d'améliorer le transport automobile [39], nous citons :

- L'apport de la connectivité Internet aux véhicules, dans le but de participer au divertissement des passagers : ce domaine représente une simple extension de ce qui se développe actuellement avec la 4G, il s'agit de donner accès, aux passagers, à leur messagerie, à Internet, à des contenus multimédias, à des jeux en ligne. . . L'amélioration des débits promise par la 5G permettra d'améliorer tous ces services.
- L'accès à des informations permettant de fournir une aide à la conduite, dans le but de réduire les accidents et d'améliorer la fluidité du trafic : ce deuxième domaine vise à rendre les véhicules plus intelligents, en utilisant des informations qui ne leur étaient pas disponibles précédemment. Cela permettrait d'améliorer la sécurité et l'efficacité des réseaux en aidant le conducteur à prendre les bonnes décisions et à s'adapter à la situation. Ainsi, les véhicules pourraient avoir accès à des informations relatives aux endroits dangereux (véhicules lents ou à l'arrêt, avertissement en cas d'encombrements, avertissement en cas de travaux de voirie, conditions météorologiques, freinage d'urgence, véhicule d'intervention d'urgence en approche. . .) ou à la signalisation (signalisation à bord des véhicules, limites de vitesse à bord des véhicules, non-respect de la signalisation/sécurité aux croisements, demande de priorité par rapport aux feux de signalisation émise par des véhicules désignés, vitesse d'approche optimale recommandée pour le passage au feu vert, etc. . .).
D'autres services, comme les informations sur les stations de recharge, la protection des usagers vulnérables de la route, la gestion du stationnement sur voirie et les informations de circulation et guidage intelligent, pourraient être utiles également.

2.2.1.2 Numérisation de l'industrie

La compétitivité ne passe pas uniquement par l'innovation et l'évolution des produits, mais aussi par la modernisation des entreprises et de leurs moyens de production.

La Commission européenne a lancé en 2016 des mesures pour renforcer la compétitivité en Europe, pour lesquelles la 5G pourrait jouer un rôle important. L'apparition de nouvelles technologies (comme la 4G, la fibre et bientôt la 5G) comme de nouveaux services (Internet des objets, cloud, big data) devraient faciliter le passage au numérique des entreprises.

En particulier, la 5G qui s'annonce comme une technologie très versatile, capable de satisfaire un très grand nombre d'usages, pourra participer à de nombreux aspects de la numérisation des entreprises.

2.2.2 l'harmonisation du spectre

La 5G se présente comme une technologie qui utilisera à la fois des fréquences basses ($f < 1$ GHz), des fréquences hautes ($1 \text{ GHz} < f < 6$ GHz) et, pour la première fois dans des réseaux grand public, des fréquences très hautes, dites « millimétriques » ($f > 6$ GHz). Cette diversité spectrale est liée aux promesses de la 5G : couverture étendue (fréquences basses), ultra haut débit (très larges canalisations en bandes très hautes), faible consommation énergétique. En outre, les services satellitaires pourront également participer au développement de cette nouvelle technologie, notamment dans les zones les plus difficilement couvertes ou pour amener un complément de débit (backhaul). A cet égard, le monde satellitaire s'intéresse à la 5G et souhaite être impliqué dans la définition de cette génération [39].

2.2.2.1 Bandes millimétriques

Les bandes dites « millimétriques », c'est-à-dire des fréquences supérieures à 6 GHz, sont essentielles pour que la 5G puisse marquer une rupture avec la 4G. Lors de la dernière Conférence mondiale des radiocommunications (CMR-15 à Genève), conférence sous l'égide de l'UIT dont l'objectif est de faire évoluer la répartition des fréquences entre utilisateurs, les différentes discussions sur la définition des futures bandes mobiles ont permis de focaliser les études de la 5G, pour les fréquences millimétriques, sur un certain nombre de bandes situées entre 24 GHz et 86 GHz (33,25 GHz identifiés au total) : 24,25 - 27,5 GHz, 31,8 - 33,4 GHz, 37 - 43,5 GHz, 45,5 - 50,2 GHz, 50,4 - 52,6 GHz, 66 - 76 GHz, 81 - 86 GHz. Il est important de souligner que, même si les bandes susmentionnées ont été identifiées comme « bandes 5G », rien n'indique encore, à ce stade, si elles pourront vraiment être utilisées pour le déploiement de cette dernière génération ; seuls les résultats des études techniques pourront permettre d'établir les contraintes et les règles à respecter ainsi que de valider la faisabilité de ces hypothèses.

la figure 2.1 [16] représente les fréquences utiliser en téléphonie mobile.

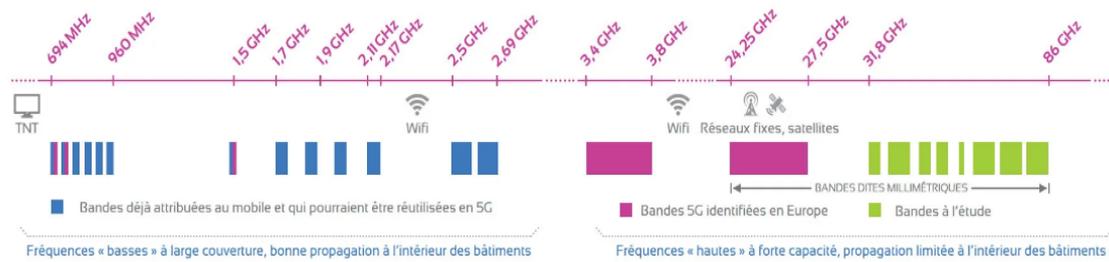


FIGURE 2.1 – L'utilisation du spectre en téléphonie mobile

2.2.2.2 Les bandes en dessous de 6 GHz

1. La bande 3,4-3,8 GHz : La 5G ne pourra pas être véhiculée complètement par les bandes millimétriques : les qualités de propagation de ces bandes rendent délicate une couverture étendue, notamment dans les zones les moins densément peuplées du territoire. En outre la maturité technologique relative à l'utilisation de ces bandes pour des communications grand public reste encore très faible. Il convient donc d'identifier une bande « cœur », inférieure à 6 GHz et proposant des canalisations suffisamment larges pour que les futurs opérateurs 5G puissent fournir des services innovants et une qualité de service en progression par rapport à la 4G. La bande 3400 - 3800 MHz semble être un bon candidat pour répondre à ce besoin. Tout d'abord, elle fait déjà l'objet d'une harmonisation pour le très haut débit mobile au sein de l'Union européenne. Dans un premier temps la bande 3400 - 3600 MHz puis la bande 3600 - 3800 MHz ont été identifiées comme des bandes dites « IMT » (pour le mobile haut débit). Ensuite, elle dispose d'une grande quantité de spectre disponible (jusqu'à 400 MHz). Enfin, les avancées technologiques (traitement d'antenne et de signal) permettent d'envisager l'utilisation de ces fréquences pour l'établissement de macro cellules, et pas simplement microcellules.
2. Les autres bandes en dessous de 6 GHz : Les bandes aujourd'hui utilisées pour la 2G, la 3G et la 4G pourraient être à l'avenir utilisées pour des déploiements 5G.

2.2.3 Enjeux de la neutralité de l'internet

Le règlement européen sur l'internet ouvert, adopté par le Parlement européen et le Conseil de l'UE le 25 novembre 2015, introduit le principe de neutralité de l'internet à un niveau élevé dans la hiérarchie des normes. La neutralité de l'internet est un principe

général garantissant l'égalité de traitement de tous les flux de données sur internet. Il exclut en particulier toute forme de discrimination à l'égard de la source, de la destination ou du contenu des flux de données. Le sujet de la neutralité de l'internet appliquée aux futurs réseaux 5G est encore très ouvert et inexploré, de nouvelles analyses pourront être menées en parallèle aux travaux de définition de la 5G [39].

2.2.4 Des cellules de plus en plus petites

Le déploiement des réseaux mobiles actuels est essentiellement basé sur l'utilisation de stations de base dites « macro » ; des sites dotés d'antennes de forte puissance sont installés pour garantir la couverture d'une zone relativement large, avec une qualité de service suffisante. L'architecture du réseau est en constante évolution : de nouvelles stations radioélectriques sont régulièrement installées afin d'augmenter la capacité des réseaux en vue de mieux répondre aux préoccupations des utilisateurs. Néanmoins, l'augmentation continue des demandes capacitaires impose aux opérateurs, déjà aujourd'hui, de densifier leurs réseaux avec des cellules toujours plus petites.

La 5G, qui verra encore probablement une forte augmentation des volumes de données échangés, et qui utilisera des bandes millimétriques, aux faibles capacités de propagation, nécessitera probablement la généralisation de la mise en place d'émetteurs radioélectriques de faible puissance (small-cells)[39].

Accès aux points hauts et « semi-hauts »

Pour qu'un déploiement puisse avoir lieu les opérateurs de téléphonie mobile ont traditionnellement besoin d'installer leurs sites sur des « points hauts » (pylônes, toit-terrasses, etc...). Ce besoin restera avéré pour les réseaux 5G, mais sera encore plus sensible pour deux raisons principales :

1. Les antennes 5G seront probablement beaucoup plus volumineuses que les antennes actuelles 2G, 3G ou 4G, du fait des traitements massive MIMO susmentionnés, qui nécessiteront l'utilisation de très nombreux éléments rayonnants.
2. Cette recherche de nouveaux sites devra également être menée pour l'implantation de petites cellules sur des points « semi-hauts », mais avec une attention d'autant plus forte que la densité de ces sites devra être élevée : les opérateurs devront dès lors déployer leurs équipements sur des infrastructures urbaines comme les abribus, les éclairages ou les bâtiments publics, les panneaux publicitaires, etc... Les pouvoirs

publics devront donc suivre avec attention le sujet afin d'adopter, si cela s'avérait nécessaire, des mesures qui pourraient faciliter le déploiement de la 5G.

2.2.5 Maximisation de la couverture et minimisation de nombre d'antennes

Le standard 5G doit assurer la couverture en haut débit à l'intérieur comme à l'extérieur des bâtiments. Cette gestion de la couverture avec une qualité de service a poussé la communauté scientifique vers de nouvelles solutions. L'idée de l'approximation du réseau c'est à dire de diminuer la distance entre les derniers point d'accès du réseau et les utilisateurs est actuellement considérée comme l'unique solution pour répondre aux exigences en matière de couverture. La capacité par utilisateur est réduite dans le cas des macrocellules, du fait du grand nombre d'utilisateurs. Résoudre ce type de problème revient à créer des cellules de petites tailles dans ces macrocellules, dans lesquelles le déploiement des équipements de communications radio de la 5G se fera. Ces cellules sont appelées 'Small cells' et représenter dans la figure 2.2 [52].

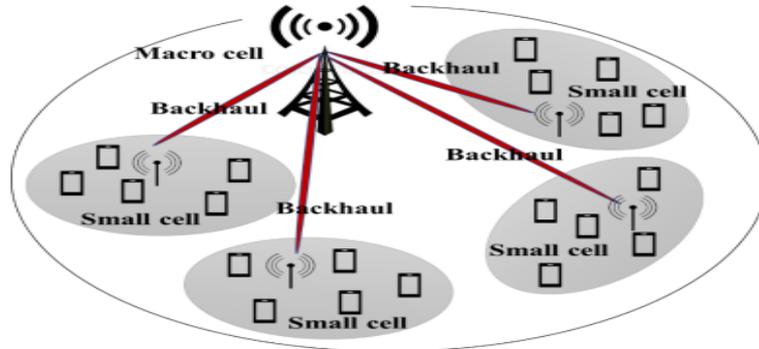


FIGURE 2.2 – Exemple d'un réseau d'accès radio ultra-dense composé d'une macrocellule et de plusieurs petites cellules

On distingue principalement trois types de Small cells en fonction de leurs puissances d'émission et de la zone de couverture[43].

1. Femtocellules : ce type de cellule permet d'émettre une puissance maximale de 24dBm afin d'avoir une couverture maximale de 100m. Les femtocells sont principalement déployées pour assurer la couverture d'un nombre restreint d'utilisateurs à l'intérieur des environnements résidentiels.
2. Picocellules : dans ce genre de cellule, la puissance de transmission varie entre 24 et 30dBm, son rayon de couverture est compris entre 200 et 300m. Les picocells peuvent être utilisées pour améliorer une couverture à l'intérieur comme à l'extérieur des bâtiments, par exemple dans les hôtels, les entreprises etc.
3. Microcellules : cette catégorie de cellule permet d'obtenir une couverture un peu plus large qui peut aller jusqu'à deux kilomètres de rayon avec une puissance maximale d'émission de 40dBm. Comme les cellules précédentes, ce type de cellule peut être également utilisé dans le but d'assurer une couverture intérieure et / ou extérieur avec un nombre d'utilisateurs simultanés qui peut aller jusqu'à 2000.

type de cellule	puissance(W)	Rayon de couverture (km)	Nombre d'utilisateurs	zone
Femtocellule	0,001 à 0,25	0,01 à 0,1	1 à 30	Interieur
Picocellule	0,25 à 1	0,1 à 0, 2	30 à 100	Interieur / Exterieur
Microcellule	1 à 10	0,2 à 2	100 à 2000	Interieur / Exterieur
Macrocellule	10 à > 50	8 à 30	>2000	Exterieur

TABLE 2.1 – Caractéristiques des différents types de cellules[43]

L'architecture du réseau doit maintenant dépendre des besoins des utilisateurs en termes de couverture et de capacité. Par exemple, une cellule serait automatiquement informée de la présence d'une personne pour déclencher des services supplémentaires, tels qu'un client entrant dans un centre commercial. Ceci va permettre une réduction considérable de la consommation énergétique. En plus de cet avantage, ces petites cellules permettront également une couverture totale c'est à dire une couverture omniprésente même dans les zones les plus isolées par exemple dans les zones rurales, les tunnels etc. En revanche, l'utilisation de ces petites cellules pour la 5G doit se faire avec l'implication d'autres techniques pour répondre aux exigences

de ce standard. Des techniques avancées comme la cohabitation de différents types de cellules c'est à dire les réseaux hétérogènes, y compris la densification du réseau et le backhaul, sont apparues comme des technologies clés appliquées dans les Small cells pour répondre aux exigences de la 5G. L'utilisation des bandes millimétriques dans ces Small cells sera également l'une des technologies les plus importantes pour fournir des services à haut débit de données pour la prochaine génération.

2.3 Les technologies révolutionnaires sur lesquelles repose la 5G

2.3.1 Massive MIMO

Massive MIMO (Multiple Inputs - Multiple Outputs) : cette technologie se caractérise par l'utilisation d'un nombre élevé de micro antennes « intelligentes », situées sur le même panneau (de 8 à 128 actuellement, mais le nombre augmentera avec l'utilisation de fréquences supérieures à 6 GHz). L'attrait de l'utilisation du massive MIMO est double : d'une part, cette technologie permet d'augmenter les débits, grâce au multiplexage spatio-temporel ; d'autre part, elle permet de focaliser l'énergie sur un terminal, pour améliorer son bilan de liaison, grâce à la formation de faisceau, ou beamforming.

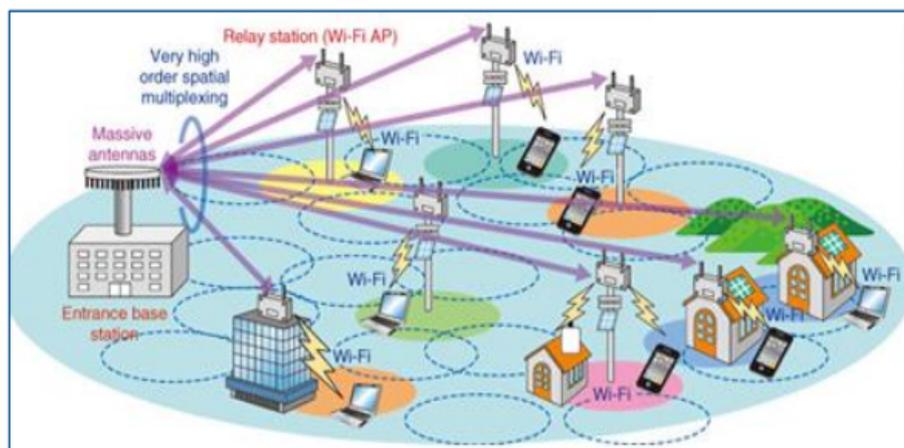


FIGURE 2.3 – exemple d'utilisation d'une antenne à formation de faisceau utilisée pour connecter des points d'accès Wi-Fi

2.3.2 Network slicing(découpe réseau en tranches)

le découpage réseau en tranche (network slicing) est l'élément clé permettant d'exploiter pleinement le potentiel de l'architecture 5G du futur. Cette technologie apporte une dimension supplémentaire au domaine de la NFV(Network function virtualisation) en permettant à de multiples réseaux logiques de fonctionner simultanément sur une infrastructure de réseau physique partagée. Elle devient ainsi partie intégrante de l'architecture 5G en créant des réseaux de bout en bout virtuels qui comprennent des fonctions de mise en réseau et de stockage [17].Les tranches de réseau peuvent couvrir plusieurs domaines de réseau, notamment l'accès, le transport, et être déployées par plusieurs opérateurs. les opérateurs de réseaux mobiles peuvent créer rapidement des tranches de réseau capables de prendre en charge une application, un service, un ensemble d'utilisateurs ou un réseau spécifique [18], ils peuvent ainsi gérer efficacement plusieurs utilisations de la 5G avec des demandes en matière de débits, latences et disponibilité différentes en divisant les ressources réseau entre de nombreux utilisateurs, ou « locataires ». Le découpage réseau en tranche (Network Slicing) s'avère extrêmement utile pour les applications telles que l'Internet des objets (IdO ou IoT) pour lesquelles le nombre d'utilisateurs peut être très élevé alors que la demande générale en bande passante reste faible. Chaque verticale 5G aura ses propres exigences. C'est pourquoi il devient important de tenir compte du découpage réseau en tranche (network slicing) dans la conception de l'architecture réseau 5G. Désormais, les coûts, la gestion des ressources et la flexibilité des configurations des réseaux peuvent tous être optimisés grâce à ce nouveau niveau de personnalisation. De plus, le découpage réseau en tranche (network slicing) permet d'effectuer des essais plus rapidement pour les nouveaux services potentiels de la 5G, tout en réduisant le délai de mise sur le marché [17].

2.3.3 Beamforming(La création de faisceaux directs)

Le beamforming peut être pris au sens littéral du terme : c'est la formation de faisceaux.C'est une autre technologie révolutionnaire essentielle au succès de la 5G . Les antennes 5G dirigent les ondes radio directement vers une cible plutôt que de les diffuser dans toutes les directions [19] comme c'est le cas avec les antennes relais qui fonctionnent comme un lampadaire. C'est à dire qu'elles émettent dans toutes les directions Grâce à la technologie du beamforming (groupage de faisceaux), le traitement du signal par les

antennes 5G est différent. Le beamforming permet en effet de faire converger les ondes émises par une antenne vers un smartphone en particulier. Et non plus d'arroser sans distinction tout l'environnement. Les antennes macro de la 5G sont donc des antennes directives qui agissent tel un phare directionnel. Le signal est dirigé dans une direction précise plutôt que d'être dirigé dans toutes les directions, comme c'est le cas aujourd'hui avec les antennes 4G. Encore mieux, les antennes 5G fonctionnent ainsi même quand les utilisateurs t en mouvement. L'avantage du beamforming, c'est qu'il permet aux antennes relais de ne pas émettre en permanence mais seulement quand cela est nécessaire. Cela représente donc un gain d'énergie considérable [20].

2.3.4 Bandes millimétriques

L'utilisation de bandes millimétriques constitue l'une des technologies de rupture de la 5G. Cette appellation correspond aux fréquences supérieures à 6 GHz qui n'ont encore jamais été prises en compte pour le déploiement des réseaux mobiles (fronthaul) pour des raisons de maturité technologique et de qualité de propagation. Pour répondre à l'incessante augmentation des débits et des volumes de données échangés, il est nécessaire d'utiliser de nouvelles bandes disposant de très larges canalisations (plus de 100 MHz par utilisateur) : les bandes millimétriques pourraient offrir de telles réserves de spectre et leur utilisation permettrait d'atteindre dans certains cas, les débits affichés dans le Tableau 1. Comparaisons entre les performances de la 4G et de la 5G. En contrepartie, leur utilisation impose le développement de toutes les technologies nécessaires, miniaturisées, à bas coût et avec une consommation énergétique compatible avec des terminaux portables (amplificateurs, codeurs, traitement de signal, antennes...). En particulier, à cause de la faible qualité de propagation des ondes millimétriques, chaque cellule aura une couverture réduite, ce qui nécessitera la mise en place de techniques de beamforming, pour mieux focaliser l'énergie transmise par les antennes [39].

2.3.5 Communication Full duplex

Dans les systèmes classiques, l'émission et la réception se font soit sur des bandes de fréquences différentes (duplexage en fréquences dit FDD, frequency division duplexing, utilisé sur toutes les bandes des réseaux mobiles français) soit à des instants différents (duplexage temporel dit TDD, time division duplexing, pressenti pour les réseaux de boucle locale radio LTE en France). Le full duplex ambitionne de permettre l'émission et

la réception simultanée d'information, sur les mêmes fréquences, au même moment et au même endroit [39].

2.4 Conclusion

Le réseau de cinquième génération (5G) devrait prendre en charge une énorme quantité de trafic de données. Il est destiné à desservir des millions de connexions sans fil. Avec l'utilisation de certaines technologies avancées telles que les petites cellules, le Massive MIMO, etc., la 5G peut prendre en charge une large gamme d'appareils et d'applications qui donneront lieu à un avenir amélioré de l'Internet des objets (IOT). Cependant, ces technologies ont leurs propres défis qui rendent difficile la mise en place de la 5G.

Tout au long de ce chapitre nous avons détaillé les défis et les technologies sur lesquelles repose la 5G, et dans le chapitre suivant nous allons nous intéresser à la communication sans fil et les protocoles qui assurent cette dernière.

Chapitre 3

Communication et Modèles

3.1 Introduction

L'internet des objets couvre un large éventail de secteurs et de cas d'utilisation qui vont d'un simple dispositif à des déploiements multiplate-formes massifs de technologies intégrées se connectant en temps réel.

De nombreux protocoles de communication, anciens et nouveaux, qui permettent aux appareils et aux serveurs de communiquer entre eux de manière nouvelle et plus interconnectée, relient ces éléments. En même temps, des dizaines d'alliances et de coalitions se forment dans l'espoir d'unifier le paysage de l'IoT.

Ce chapitre va fournir une liste des protocoles les plus couramment utilisés pour alimenter les appareils et les applications IoT.

3.2 Communication dans les réseaux sans fil

Le réseau sans fil offre deux modes de fonctionnement, le mode avec infrastructure et le mode sans infrastructure ou mode ad hoc

3.2.1 Réseaux avec infrastructures

Les réseaux sans fil que nous utilisons aujourd'hui, tels que le GSM / GPRS / UMTS ou le Wi-Fi, sont ce que l'on appelle des réseaux sans fil à stations de base. En mode avec infrastructure, également appelé le mode BSS (Basic Service Set) certains sites fixes, appelés stations support mobile (Mobile Support Station) ou station de base (SB) sont munis d'une interface de communication sans fil pour la communication directe avec des sites ou unités mobiles (UM), localisés dans une zone géographique limitée, appelée cellule . A chaque station de base correspond une cellule à partir de laquelle des unités mobiles peuvent émettre et recevoir des messages. Alors que les sites fixes sont interconnectés entre eux à travers un réseau de communication filaire, généralement fiable et d'un débit élevé[21].

Un mobile communique par radio avec une station fixe (station de base). Pour que cet échange se passe correctement il faut qu'il y ait un premier dialogue entre les deux pour établir les fréquences qu'ils utiliseront lors de la communication et pour se synchroniser. Les stations de base émettent régulièrement des appels aux mobiles qui souhaiteraient établir une communication et scrutent en permanence un canal de communication où les

mobiles donnent leur requête. Dans le cas où la station de base dispose de canaux disponibles, elle indique au mobile les fréquences qui seront utilisées pour la communication. Un mobile (M) peut établir le contact avec plusieurs stations de base. Celles-ci échangent entre elles les informations nécessaires pour décider de la station avec laquelle le mobile va communiquer. Ce sera en principe la station qui reçoit les signaux de meilleure qualité (niveau de réception plus élevé, niveau de bruit plus faible, etc...). Cette station indique au mobile les fréquences qui seront utilisées lors de la suite de la communication.

3.2.2 Réseaux sans infrastructures

Le réseau mobile sans infrastructure également appelé réseau Ad hoc ou IBSS (Independent Basic Service Set) ne comporte pas l'entité « site fixe », tous les sites du réseau sont mobiles et se communiquent d'une manière directe en utilisant leurs interfaces de communication sans fil . L'absence de l'infrastructure ou du réseau filaire composé des stations de base, oblige les unités mobiles à se comporter comme des routeurs qui participent à la découverte et la maintenance des chemins pour acheminer les paquets vers les hôtes destinataires dans le réseau[21].

Pour ce réseau, les capteurs ou actionneurs sont les systèmes clés de la communication.

Réseaux de capteurs : La communication inter-machines permet l'échange d'information entre leurs différentes entités telles que les capteurs, actionneurs ou des robots. Cet échange consiste à collecter de l'information provenant de différentes sources an de l'acheminer vers les destinataires. Ceci s'inscrit dans un réseau auto-organisé ne nécessitant pas d'infrastructure fixe, et qui utilise des algorithmes permettant de maintenir une connectivité maillée ou hiérarchique. Le principal avantage d'un tel réseau est sa capacité d'offrir des services robustes, dont la maintenance est facile en un minimum de temps et à faible coût de déploiement.

Durant ces dernières années, les avancées technologiques ont permis un grand nombre de conception et d'implémentation de ces réseaux ayant pour objectif de faciliter l'accès à plusieurs applications jusqu'alors inaccessibles faute de lourdeur d'infrastructure. Les réseaux de capteurs, offrent la possibilité d'échanger des informations, de les traiter mais également de les transmettre. Ils sont constitués d'un ensemble de capteurs, possédant des ressources limitées, mais qui leur permettent néanmoins d'acquérir des données, de les traiter et de les communiquer via des liaisons radio. Chaque capteur analyse son environnement, et envoie les données récoltées aux capteurs appartenant à sa zone de

couverture. Les capteurs de relai retransmettent l'information sur leur propre région de couverture, ce qui permet une couverture entière du réseau.

Depuis presque 30 années, les solutions d'amélioration apportées aux capteurs et leurs réseaux ne cessent de croître. Leurs objectifs sont la minimisation de la taille et le nombre des messages générés par le réseau ainsi que l'énergie nécessaire pour les transmettre tout en garantissant la fiabilité de l'information échangée. Une optimisation matérielle et logicielle est requise dans ce sens, ainsi que l'amélioration des algorithmes de routage et les méthodes d'accès au canal[48].

3.3 Protocoles de communication

Il existe un nombre très important de protocoles, qu'il s'agisse de protocoles 'constructeurs' ou de protocoles standardisés et normalisés. Certains s'adressent à des besoins spécifiques, d'autres sont de portée plus générale ; voici quelques exemples de protocoles utilisés dans différents domaines d'application :

- Informatique et Internet : TCP/IP, HTTP/HTTPS, FTP/FTPS, SNMP, etc.
- Instrumentation et Automatisation : Modbus, Ethernet IP, BacNet, FINS, SDI-12, OPC, etc.
- Télémétrie et Télégestion : DNP3, IEC60870, etc.
- IoT (IdO) : MQTT, LoRaWAN, LTE-M, NBIoT, SigFox, etc.

3.3.1 Technologies utilisés dans l'IOT

3.3.1.1 Technologies à courte portée

Les réseaux de courte portée à faible puissance conviennent aux maisons, bureaux et autres environnements de petite taille. Ils ont tendance à avoir besoin uniquement de petites batteries et leur fonctionnement est généralement peu onéreux.

Bluetooth : très largement utilisé dans le monde. Quasiment tous les smartphones sont équipés de cette techno, fréquemment utilisée pour faire communiquer les wearables. Il a une portée de 60 mètres en terrain dégagé et "consomme environ 20 fois moins d'énergie que le Wi-Fi", selon Thomas Gauthier, le CEO de l'entreprise de domotique NodOn. La dernière version de cette techno, le Bluetooth 5, est plus adaptée à l'IoT et dispose d'une portée deux fois supérieure à celle de son aînée[22].

Wi-fi : permet de transférer un grand nombre de données rapidement, jusqu'à 600 mégabits par seconde (mbps). Ce protocole de communication peut être utilisé pour connecter des caméras de surveillance qui filment des images lourdes 24 heures sur 24. Il est bidirectionnel, ce qui permet de mettre facilement à jour les appareils. Sauf qu'il est très énergivore et ne peut être utilisé que pour des appareils branchés au secteur, dans la maison par exemple[22].

ZigBee et ZigBee PRO : Développés par ZigBee Alliance, ZigBee est destiné aux applications de domotique et ZigBee PRO pour les réseaux industriels de contrôle et de télémessure. Leur couche physique, basée aussi sur le standard IEEE 802.15.4, scanne et sélectionne la fréquence qui a le moins d'interférence. Les couches supérieures (réseau et application) sont spécifiées et de la sécurité est introduite dans ce protocole [26].

Z-Wave : protocole de communication dédié à la domotique. Sans fil, il est facile à installer dans la maison. Il a une portée de base de 30 mètres. C'est un réseau maillé, c'est-à-dire que chaque appareil connecté au système est émetteur de données mais peut aussi relayer celles qui sont émises par ses voisins. Cela permet d'élargir sa portée.

Un bémol toutefois : les clients qui créent dans leur logement un réseau Z-Wave doivent veiller à installer régulièrement dans l'espace des appareils reliés au secteur, faute de quoi ils risquent de créer des zones blanches. Ce sont les seuls qui restent en activité 100% du temps, pour éventuellement transmettre les données de leurs comparés. Ceux qui fonctionnent sur batterie sont la plupart du temps en sommeil pour ne pas consommer trop (le Z-Wave brûle tout de même deux fois plus d'énergie que le Bluetooth Low Energy). Ils ne relaient donc les données que lorsqu'ils s'allument. Le Z-Wave n'est par ailleurs pas aussi universel que le Wifi. Tous les appareils de la maison ne pourront pas forcément communiquer avec un objet connecté via cette technologie[22].

EnOcean : EnOcean est une technologie qui émerge. Elle n'utilise pas de batterie comme les autres technologies et les capteurs utilisent l'énergie de leur environnement immédiat (en utilisant des panneaux solaires par exemple). EnOcean utilise les fréquences autour de 868 MHz et 315 MHz et a une portée de 300 mètres en communication libre [26].

3.3.1.2 Les technologies à longue portée

Communément appelées LPWAN pour Low Power Wide Area Networks, ces technologies sont développées pour faciliter l'Internet des Objets (IoT) en offrant des possibilités de communication à très basse consommation d'énergie et très longue distance. Parmi ces technologies IoT on distingue celles qui sont basées sur les réseaux mobiles cellulaires et celles qui ne le sont pas. Les technologies basées sur les réseaux mobiles telle que la 5G par exemple, offrent de large couverture mais ont une consommation excessive d'énergie. Par contre les technologies telles que Sigfox, LoRa et NB-IoT sont les leaders de la longue distance avec une faible consommation d'énergie. Dans ce paragraphe, nous allons faire une étude comparative des technologies LPWAN.

Sigfox : Développée en 2010 à Toulouse, Sigfox développe ses propres solutions IoT à travers 31 pays. C'est un réseau propriétaire, les stations de base sont équipées de la technologie SDR (Software-Defined Radio) qui les connecte au réseau par de connexion de type IP. Les débits offerts atteignent quelques centaines de bits/s pour des distances allant jusqu'à 40 km [26].

NB-IoT : NB-IoT (Narrow Band-Internet of Things) est une technologie LPWAN basée sur la radio bande étroite (narrow band) Un canal radio est dit bande étroite lorsque le message transmis dans la bande passante ne dépasse pas excessivement la bande de cohérence du canal. Elle a été développée par le groupe de travail 3GPP (3rd Generation Partnership Project) en 2016. Le protocole de communication de NB-IoT est basé sur LTE (Long Term Evolution). Les débit offerts sont de l'ordre de 200 kbits/s dans le sens descendant tandis qu'ils sont de seulement 20 kbits/s dans le sens ascendant[26].

LoRaWAN : LoRaWAN est le protocole MAC de la technologie LoRa. Elle opère dans la bande ISM et est réputée être un standard ouvert, pourtant, la couche physique utilise une modulation à étalement de spectre qui est propriétaire au consortium LoRa Alliance . Les débits théoriques sont compris de 300 bits/s à 50 kbits/s et les distances en visibilité directe atteignent les 30 km [26].

Les technologies de 3GPP : ou Les réseaux cellulaires, fournis par les opérateurs télécoms traditionnels, présentent l'avantage de transférer d'importantes quantités de données (pour faire transiter 83 mégabits, il faut 22 secondes en 3G et 1 seconde en 4G, selon l'opérateur Virgin Mobile). La 5G annoncée pour 2020 promet des avancées pour l'IoT, avec notamment une consommation moindre et un temps de latence très

faible. Cette technologie est attendue en particulier pour les véhicules autonomes et la transmission de vidéo mais la mise en place d'une couverture nationale risque de prendre plusieurs années.

Très gourmands en énergie ces réseaux sont à réserver à des appareils branchés au secteur. Le prix des abonnements (qui dépend de l'opérateur choisi) est nettement plus élevé que ceux de Sigfox et LoRaWAN. Par ailleurs, il faut prévoir un espace sur l'objet connecté pour insérer une carte SIM.

MQTT : MQTT est un protocole de transport de messages en modèle Client/Server publish/subscribe. Il est léger, ouvert, simple et conçu pour être facile à mettre en oeuvre. Ces caractéristiques le rendent idéal dans de nombreuses situations, notamment dans des environnements contraints tels que la communication machine à machine (M2M) et l'Internet des objets (IoT) où une empreinte de code réduite est requise et/ou la bande passante réseau est cruciale[23].

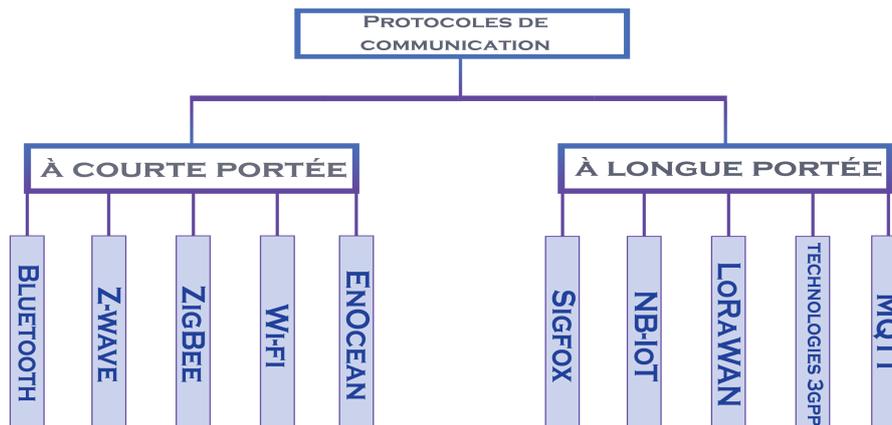


FIGURE 3.1 – Protocoles de communication

3.4 System of systems

3.4.1 Définition

Un système est une collection d'éléments qui produisent ensemble un résultat qui ne peut pas être obtenu par les éléments fonctionnant individuellement .Ces éléments d'un système peuvent eux-mêmes être vastes et complexes, et constitués de sous-éléments agissant de concert[37]. Le terme Système de systèmes (SoS) peut être compris comme un ensemble de systèmes constitutifs complexes, indépendants et hétérogènes, qui sont composés pour former un système plus vaste et plus complexe visant à accomplir une mission donnée. Chaque système constituant accomplit sa propre mission individuelle et est en mesure de contribuer de manière collaborative à l'accomplissement de la mission globale du SoS [50].

3.4.2 Types de SOS

Dans le monde interconnecté d'aujourd'hui, les SoS apparaissent dans un large éventail de circonstances. Dans les situations où le SoS est reconnu et traité comme un système à part entière, un SoS peut être décrit comme l'un des quatre types suivants :

SOS dirigé : dans lequel le système de systèmes interopérable est construit et géré pour remplir des objectifs spécifiques. Les systèmes constitutifs sont contractuellement subordonné à une direction centrale du SoS. Le système de combat futur de l'armée américaine est un exemple de SoS dirigé.

SOS reconnu : dans lequel il y a des objectifs reconnus, un responsable désigné et des ressources pour le SoS. Cependant, les systèmes constitutifs retournent leur propriété indépendante, leurs objectifs, leur financement, leurs approches de développement et de maintien. Le système de défense antimissile balistique est un exemple de SoS reconnu.

SOS collaboratif : dans lequel les systèmes constituants collaborent « volontairement » de manière agnostique pour atteindre un objectif central convenu. Les acteurs centraux décider collectivement comment fournir ou refuser le service, fournissant ainsi des moyens d'appliquer et de maintenir les normes. Le système financier mondial est un exemple de SoS collaboratif .

SOS virtuel : dans lequel il n’y a pas d’autorité de gestion centrale et d’objectif central pour le SoS. Un comportement à grande échelle émerge et ce type de SoS repose sur des mécanismes relativement invisibles pour le maintenir. Le Global Information Grid est un exemple de SoS virtuel [42].

3.4.3 Caractéristiques des SOS

- **Indépendance opérationnelle des systèmes constitutifs** : Dans un SoS, les systèmes constitutifs fonctionnent indépendamment du SoS et des autres systèmes c’est-à-dire chaque système constituant peut fonctionner indépendamment et est capable d’atteindre ses propres objectifs en l’absence des autres systèmes . Le plus souvent, ces systèmes existaient avant la formation du SoS et, dans de nombreux cas, dans le domaine de la défense, ces systèmes sont déployés et utilisés lorsqu’ils sont appelés à prendre en charge une nouvelle capacité.
- **Indépendance de gestion des systèmes constituants** : Les systèmes d’un SoS sont gérés de manière indépendante et peuvent être ajoutés ou supprimés du Système de Systèmes. et leurs propriétaires/gestionnaires peuvent faire évoluer les systèmes pour répondre à leurs propres besoins .
- **Distribution géographique** : Dans de nombreux cas, les systèmes constitutifs d’un SoS sont répartis géographiquement et cela limite leur interaction à l’échange d’informations qui limite l’interaction des systèmes constitutifs à l’échange d’informations
- **Processus de développement évolutif** : Le développement de SoS est basé sur les développements des systèmes constitutifs dans lesquelles des fonctions et des objectifs sont ajoutés, supprimés ou modifiés selon les besoins, c’est- à-dire ; le SoS s’adapte pour atteindre ses objectifs (éventuellement évolutifs) à mesure que ses technologies sous-jacentes et ses besoins évoluent avec le temps
- **Comportement émergent** : Le comportement du système émergent peut être considéré comme une conséquence des interactions et des relations entre les éléments du système plutôt que du comportement des éléments individuels c’est-à-dire ; la fonctionnalité et le comportement du SoS se développent d’une manière non atteinte par les systèmes individuels . Il émerge d’une combinaison du comportement et des propriétés des éléments du système et de la structure du système ou des interactions autorisées entre les éléments, et peut être déclenché ou influencé par un stimulus de

l'environnement du système [31, 42].

3.4.4 La 5G est-elle un system of systems ?

3.4.4.1 Caractéristiques de l'IoT

- **Hétérogénéité des dispositifs** : l'IoT implique une variété d'objets hétérogènes connectés, dont certains sont intelligents et peuvent prendre des décisions de manière autonome.
- **Composants distribués** : un grand nombre d'objets intelligents rejoignent l'IoT - ainsi l'IoT est en constante évolution. **Capacités d'échange de données omniprésentes** : objets intelligents et les unités de calcul échangent une énorme quantité d'informations.
- **Capacités de localisation et de suivi** : les objets IoT sont identifiés de manière unique et traçables.
- **Capacités d'auto-organisation** : les composants IoT peuvent avoir des capacités d'auto-adaptation
- **Interopérabilité sémantique et gestion des données** : des techniques de gestion intelligente des données sont nécessaires pour analyser les données échangées entre les composants IoT [27].

Maier considère que les systèmes qui possèdent une indépendance opérationnelle et de gestion sont des SoS, quelles que soient la complexité et la répartition géographique des constituants pertinents. Boardman et Sauser ajoutent trois caractéristiques supplémentaires :

1. Appartenance : la réalisation d'objectifs généraux est attribuée à SoS et non à un élément individuel.
2. Connectivité : les électeurs peuvent échanger des messages et informations.
3. Diversité : les constituants sont hétérogènes, évolutifs et interopérables.

Il est clair que l'IoT et le SoS partagent certaines caractéristiques majeures. Par exemple, comme les SoS, les composants IoT sont hétérogènes, autonomes, capables de communiquer, souvent réparties, opérationnelles et managériales indépendantes. Les deux domaines sont évoluer et fonctionner dans des situations dynamiques menant à des comportements émergents. Dans ce contexte, l'Internet des objets peut être considéré comme un système de systèmes.

3.4.4.2 La 5G devient le fondement de l'internet des objets :

L'Internet des objets (IoT) fait référence à la vision de connecter chaque chose à Internet, Elle joue un rôle important dans le développement des villes intelligentes car elle permet par exemple de monitorer la pollution de l'air et détecter des changements en temps réel ; La 5G permet cette connectivité et cette capacité de traitement des données car elle offre des transmissions à haut débit, une couverture et une bande passante accrues, une faible latence, une capacité amplifiée d'exécution à distance sur une large zone, une augmentation du nombre d'appareils et de smartphones pouvant se connecter, ainsi que des possibilités améliorées de découpage du réseau et d'informatique en périphérie. Chacun de ces éléments permet aux réseaux IoT de fonctionner efficacement. Des exemples originaux de SoS ont été tirés de l'armée ainsi que le transport et l'aviation. Dans notre cas nous allons présenter les différents sous-systèmes que constitue la ville intelligente(Système) [40].

Après avoir analysé les caractéristiques de l'internet des objets et du système de systèmes nous concluons l'importance de la 5G qui permet l'interaction et la communication entre les composants des sos, notamment dans le cas de l'IoT qui est considéré comme un sos.

3.5 Ville intelligente

Au coeur de la ville intelligente, chaque lampadaire peut recueillir et transmettre de l'information, ces lampadaires connectés et intelligents permettent de nombreuses applications. La 5G offre des capacités de débit bien plus élevées que la 4G, Son apport est donc bien visible pour certaines applications comme les caméras de surveillance capturant le trafic en temps réel. Nous allons explorer les différentes possibilités offertes par la 5G pour la Smart city.



FIGURE 3.2 – Au coeur de la ville intelligente

- L'école intelligente : des caméras intelligentes dans les écoles améliorent la sécurité des élèves et le personnel (entrée non autorisée refusée),il permet de suivre l'équpement pour réduire les pertes. Afin d'améliorer la sécurité et la planification les parents et la direction de l'école sont informés de la position de chaque autobus et leur arrivé prévue grâce au système GPS qui les tiennent informés.
- Des stationnements connectés réduisent la pollution : les automobilistes non plus à tourner en rond à la recherche d'une place de stationnement grâce à un système connecté qui les avise une place disponible en plus de faire gagner du temps et économiser de l'argent aux automobilistes ce système réduit la pollution.
- Des autobus connectés offrent un transport amélioré : des services de transports en commun connectés avise les usagers de l'heure exacte du prochain passage de l'autobus à bord des véhicules les usagers profitent de la connectivité wi-fi et des écrans HD permettent de générer des revenus publicitaires.
- Des caméras et des détecteurs intelligents assurent la sécurité des usagers : La 5G va considérablement améliorer les services Smart City liés à la sûreté et à la sécurité publique. L'analyse en temps réel des enregistrements vidéo de lieux publics couplée à un logiciel biométrique permettra d'identifier rapidement les situations dangereuses et d'alerter automatiquement les autorités dans des situations telles qu'un accident de voiture ou une attaque terroriste.
- Des accessoires portatifs améliorent les communications des premiers répondants et les délais d'intervention :les premiers répondants sont connectés aux moyens d'ac-

cessoires portatif qui offre la communication bidirectionnelle grâce à ses accessoires , il est possible de déterminer avec précision la position de tous les répondants et le lieu des incidents les répartiteurs et les chefs de service peuvent mieux maîtriser la situation.

- les services de ramassage de déchets connaissent en temps réel le niveau de remplissage des conteneurs.
- des capteurs météorologiques permettent de gérer l’arrosage automatique sans gaspillage .
- Des infrastructures connectées surveillent la pression de l’eau : des capteurs installés dans le sol détectent les fuites dans les réseaux d’aqueduc et commandent des travaux de réparation (prévention énonnation).
- plus besoin d’aller relever les compteurs d’eau ou d’électricité, la consommation sera connue en temps réel, cela permet aussi d’économiser les ressources.
- Des médecins et des ambulanciers connectés pour sauver des vies : la technologie permet de sauver des vies en connectant les ambulanciers et les médecins les hôpitaux savent à quel moment arrive une ambulance, les médecins peuvent consulter l’historique médical du patient qui leur a été transmis avant son arrivée la paperasse se trouve réduite et de meilleurs soins médicaux sont offerts. En plus, La télésanté est actuellement sous le feu des projecteurs en raison de la pandémie de COVID-19. Les médecins et les infirmières doivent faire face aux blessures et aux maladies habituelles en plus de COVID-19, et ils doivent le faire à distance dans de nombreux cas. La technologie 5G est nécessaire pour mieux répondre aux quantités d’informations de télésanté générées.
- les plans de feux pourront être adaptés afin de mieux réguler le trafic et éviter les bouchons : La 5G sera fortement recommandée, si une ville souhaite diffuser des vidéos de haute qualité pour une analyse en temps réel..
- Economiser l’énergie électrique par l’installation des capteurs qui déclenche l’allumage des lampadaires quand personne passe cela permet aussi de ne pas déranger des animaux nocturnes.

Les habitants de la ville intelligente pourraient accéder à ces informations via des applications mobiles, qui sont le lien entre les citoyens et les services offerts par la ville.

3.6 Conclusion

Dans les réseaux sans fil il existe deux types de communication à savoir sans et avec infrastructure, et pour assurer cette communication des protocoles sont utilisés selon le réseaux auquel l'objet appartient (longue et courte portée). Dans ce chapitre nous avons détaillé en premier lieu les protocoles de communication les plus utilisés dans la communication des réseaux sans-fil, en second lieu nous avons expliqué le concept *System of Systems* et enfin nous avons illustrer un scénario d'une *Smart city* que nous simulerons dans le prochain chapitre .

Chapitre 4

Simulation

4.1 Introduction

De nos jours, la simulation connaît un essor considérable, et ce grâce à l'intérêt que présente les modèles informatiques des systèmes simulés. Elle consiste essentiellement à modéliser un système quelconque, en offrant une représentation de toutes les entités de ce système, leurs comportements propres et ainsi leurs interactions.

La première partie de ce chapitre va toucher aux aspects théoriques : le concept d'agent, le système multi-agents et la simulation à base d'agents, nous passerons ensuite à la réalisation de notre projet *Smart city* et une partie de la ville intelligente *l'hôpital intelligent* en définissant d'abord les outils nécessaires pour son implémentation et les étapes à suivre pour cette simulation.

4.2 Agent et Système multi-agents

4.2.1 Agent

4.2.1.1 Définition

Un agent est un système informatique encapsulé situé dans un environnement dans lequel il est capable d'effectuer une action flexible et autonome, compatible aux objectifs de la conception[47]. Les agents sont :

- des entités clairement identifiables de résolution de problèmes avec des bornes et des interfaces bien définies.
- situés dans un environnement particulier ; ils reçoivent des entrées liées aux états de cet environnement par des capteurs et agissent sur cet environnement par des émetteurs.
- destinés à atteindre un objectif spécifique.
- autonomes et responsables de leur comportement.
- capables d'adopter un comportement flexible pour résoudre des problèmes selon les objectifs de la conception ; ils sont réactifs (capables de s'adapter aux changements d'état de leur environnement) et proactifs (capables d'adopter un nouvel objectif).
- capables dans un univers multi-agents, de communiquer, coopérer, se coordonner, négocier les uns avec les autres.

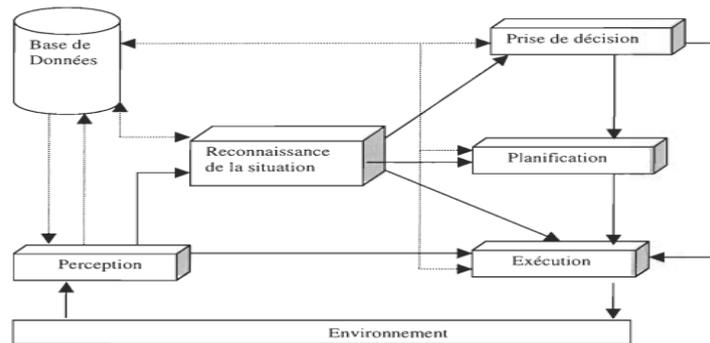


FIGURE 4.1 – Architecture d'un agent

4.2.1.2 Propriétés

Un agent est un système informatique, situé dans un environnement, et qui agit d'une façon autonome et flexible pour atteindre les objectifs pour lesquels il a été conçu[30].

1. **situé** : l'agent est capable d'agir sur son environnement à partir des entrées sensorielles qu'il reçoit de ce même environnement. Exemples : systèmes de contrôle de processus, systèmes embarqués, etc.
2. **autonome** : l'agent est capable d'agir sans l'intervention d'un tiers (humain ou agent) et contrôle ses propres actions ainsi que son état interne.
3. **flexible** : l'agent dans ce cas est :
 - capable de répondre à temps : l'agent doit être capable de percevoir son environnement et élaborer une réponse dans les temps requis.
 - proactif : l'agent doit exhiber un comportement proactif et opportuniste, tout en étant capable de prendre l'initiative au "bon" moment.
 - social : l'agent doit être capable d'interagir avec les autres agents (logiciels et humains) quand la situation l'exige afin de compléter ses tâches ou aider ces agents à accomplir les leurs.

4.2.1.3 Types d'agents

Plusieurs classifications ont été avancées dans la littérature des agents, et sont essentiellement basées sur les deux critères d'intelligence et de mobilité[25].

Selon le critère d'intelligence : La notion d'agent s'attache à tout problème complexe, d'où la nécessité de décomposer le problème en sous problèmes, la nature des problèmes à-

résoudre nous ramène à penser concevoir les agents comme des entités "intelligentes", capables de résoudre le problème eux même, guidés par un ensemble de buts à satisfaire. A cet effet on peut citer deux grandes "écoles" de pensée :

Agent naturel : s'il est doté de possibilité d'auto-apprentissage.

Agent réactif : s'il est capable de réagir à des événements externes, tel le pilotage d'un équipement matériel par exemple.

Agent de traitement : si son rôle est d'effectuer des traitements et des calculs. Dans ce cas, un agent est un acteur, au sens déjà défini.

Agent cognitif : s'il possède une expertise dans un domaine bien précis, qui ne contient pas forcément des données et des méthodes procédurales, mais une base de connaissances et qui peut, en outre, initier des inhérences sur sa base de connaissances et celles des autres de même type.

Selon le critère de mobilité : On peut citer deux types d'agents :

Agent fixe : est un agent réactif ou cognitif, situé sur un poste isolé, appartenant ou non à un réseau et ayant un objectif à atteindre sur la base d'exécution d'un script, en collaboration avec les autres agents du système. Un agent fixe est généralement facile à implémenter. Il est associé à un thread ou un processus pour son activation, et il communique avec les autres agents de son environnement via des middlewares, bus Corba, Soap, etc.

Agent mobile : l'utilisation des agents mobiles présente plusieurs avantages :

- équilibrage de charge en terme de processus de calcul : Un agent mobile peut en effet se déplacer sur un ordinateur plus puissant pour effectuer un calcul complexe. De même, il peut quitter une machine qui est saturée pour aller sur une autre.
- équilibrage de charge en terme de traitement de données : Un agent qui a besoin de traiter une grande quantité de données situées sur un autre ordinateur, comme une base de données par exemple. Il peut se déplacer sur l'ordinateur possédant ces données et revenir avec le résultat. Cela permet d'éviter de faire transiter les données via le réseau.
- Agents nomades, à la recherche d'une information sur réseau, comme dans l'e-commerce, l'e-maintenance, la fouille de données, etc.

4.2.2 Système multi-agents

4.2.2.1 Définition

Un système multi-agents comporte plusieurs agents qui interagissent entre eux dans un environnement commun. Certains de ces agents peuvent être des personnes ou leurs représentant, ou même des machines mécaniques. S'il y a moins de trois agents, nous parlons plutôt d'interaction homme-machine, ou machine-machine que de système multi-agents[38] .

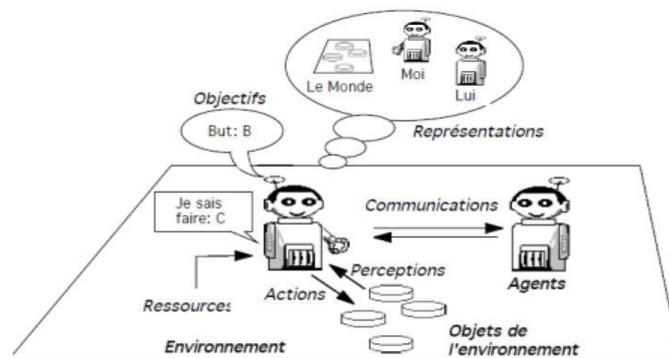


FIGURE 4.2 – Système multi-agents

4.2.2.2 l'environnement

Dans un système multi-agents, on appelle environnement l'espace commun aux agents du système. Un environnement peut être :

1. Accessible/inaccessible (observable/non observable) : Accessible si un agent peut, à l'aide des primitives de perception, déterminer l'état de l'environnement et ainsi procéder, par exemple, à une action. Si l'environnement est inaccessible alors il faut que l'agent soit doté de moyens de mémorisation afin d'enregistrer les modifications qui ont survenues.
2. Déterministe/ non déterministe : selon que l'état futur de l'environnement ne soit, ou ne soit pas, fixé que par son état courant et les actions de l'agent. Dans un environnement déterministe, une action a un effet unique garanti.
3. Discret/Continu : discret si le nombre des actions faisables et des états de l'environnements est fini [38].

4.2.2.3 Caractéristiques d'un système multi-agents

Un SMA est généralement caractisé par :

1. Chaque agent possède des informations et/ou des capacités de résolution de problèmes limitées, ainsi chaque agent a un point de vue partiel.
2. Il n'y a pas de contrôle globale du système multi-agents. Mais dans le cas du contrôle centralisé, il peut exister une entité qui a une vue globale de l'activité du système et qui a la charge de contrôler tout le système.
3. Les données et les connaissances sont décentralisées [38].

4.2.2.4 Typologies des systèmes multi-agents

L'importance de l'approche système multi-agents s'est développée considérablement rendant les systèmes d'information de plus en plus distribués et à grande échelle. On distingue différents types de systèmes multi-agents[38].

SMA réactif : Un système multi-agents réactif est composé d'agents réactifs. L'étude des SMA réactifs cherche à comprendre le fonctionnement du système comme un tout, en se focalisant sur les aspects collectifs du système c'est-à-dire sur les interactions et la dynamique qui en résulte. Ce système présente plusieurs avantages tels que la fiabilité (assurée par le grand nombre d'agents du système et leur simplicité) et la grande flexibilité vis à vis du changement dynamique de son environnement. Cependant, la création de tels systèmes doit faire face aux difficultés de prédiction du comportement global non représenté explicitement dans le système, et aussi on peut avoir des difficultés à contrôler les comportements individuels par rapport à un objectif non représenté explicitement.

SMA cognitif : Un système multi-agents cognitif est composé d'agents cognitifs. L'étude de ce système cherche à améliorer les comportements individuels des agents en s'intéressant à leur intelligence individuelle, leur modèle cognitif, et leurs communications. Ce type de système met l'accent sur l'agent et ses capacités. Ce système est facile à concevoir pour les applications dont l'évolution est prévisible, aussi il tire profits des mécanismes de représentation complexe, et permet l'échange d'information. Cependant, il présente quelques inconvénients tels que : la difficulté de représenter les connaissances dans les problèmes complexes, la complexité de communications entre agents, la faible performance pour des actions en temps réel, temps impor-

tant de réalisation des tâches et l'impossibilité d'adaptation pour un environnement dynamique.

Le tableau 4.1 résume les différences entre les modèles cognitifs et les modèles réactifs[38].

Système d'agents cognitifs	Système d'agents réactifs
représentation explicite de l'environnement	pas de représentation
tiennent compte de leur passé	pas de mémoire de leur passé
Agents complexes	agents simples
petit nombre d'agents	grand nombre d'agents

TABLE 4.1 – Comparaison entre système d'agents cognitifs et système d'agents réactifs

4.2.3 Pourquoi les SMA ?

Les SMA sont des systèmes idéaux pour représenter des problèmes possédant de multiples méthodes de résolution, de multiples perspectives et/ou de multiples solveurs. Ces systèmes possèdent les avantages traditionnels de la résolution distribuée et concurrente de problèmes comme la modularité, la vitesse (avec le parallélisme), et la fiabilité (dûe à la redondance). Ils héritent aussi des bénéfices envisageable de l'Intelligence Artificielle comme le traitement symbolique (au niveau des connaissances), la facilité de maintenance, la réutilisation et la portabilité mais surtout, ils ont l'avantage de faire intervenir des schémas d'interaction sophistiqués. Les types courants d'interaction incluent la coopération (travailler ensemble à la résolution d'un but commun) ; la coordination (organiser la résolution d'un problème de telle sorte que les interactions nuisibles soient évitées ou que les interactions bénéfiques soient exploitées) ; et la négociation (parvenir à un accord acceptable pour toutes les parties concernées)[30].

4.3 Simulation

La simulation est une technique de modélisation qui consiste à reproduire le comportement dynamique d'un système sur ordinateur afin de mieux le connaître, de mieux maîtriser son évolution dans le temps dans un environnement donné, et d'évaluer ses performances.

4.3.1 Modélisation et simulation à base d'agents

La modélisation à base d'agents est une approche de la simulation dans laquelle le système étudié est représenté par un ensemble d'agents. Les propriétés les plus fondamentales de tout agent sont qu'il est autonome. L'agent est équipé d'un ensemble d'objectifs de haut niveau et chaque fois qu'il a le choix d'une action, il choisit l'action qu'il pense être la meilleure pour atteindre l'un de ses objectifs (ou sous-objectifs).

Dans le domaine des agents, un certain nombre d'outils sont disponibles. Celles-ci vont des outils basés sur java, aux outils basés sur Logo tels que : StarLogo, NetLogo... etc. Chacun de ces outils a des forces et des faiblesses différentes[51].

4.3.2 Choix de Netlogo

NetLogo est un langage de programmation multi-agents basé sur le langage de programmation Logo. Dans sa version actuelle, il est distribué en open source. Il a été conçu et développé dès le départ de la programmation pour la modélisation/simulation de phénomènes collectifs naturels. Il est bien adapté à la modélisation de systèmes complexes composés de centaines, de milliers d'agents agissant en parallèle. Il a la possibilité de « jouer » avec de nombreuses simulations en sociologie, biologie, médecine, physique, chimie, mathématiques, informatique, économie et psychologie sociale, et de créer ses propres modèles [24].

Pour notre cas, nous avons choisi de faire notre simulation avec le simulateur Net Logo pour les raisons suivantes :

- Simple à manipuler.
- Il utilise une extension du langage LOGO ce qui permet à un utilisateur non informaticien de développer des programmes sans connaissance des langages informatique classique.
- Il est conçu en java (langage orienté objet) ce qui rend portable sur n'importe quelle machine.
- Il est utilisé pour modéliser et simuler des systèmes complexes y compris les systèmes multi-agents, simulation sociales et systèmes biologiques, en raison de sa capacité à modéliser problèmes basées sur des abstractions humains plutôt que des aspects

purement technique.

4.4 Mise en œuvre de la Ville intelligente

4.4.1 Scénario

Dans notre ville intelligente tout est connecté. A 6h du matin, un citoyen (médecin) quitte sa maison pour aller au travail (Hôpital), l'éclairage en veille s'allume au passage. Dans sa route des feux-rouge intelligents sont installés afin de réguler le trafic et éviter les bouchons. Dès son arriver au parking intelligent de l'hôpital, il sait si des places libres sont disponibles grâce a un jalonnement dynamique installé a l'entrée du parking allumé en vert en cas de disponibilité et en rouge dans le cas contraire.

Pour plus de sécurité, l'hôpital est équipé de cameras de surveillance intelligentes. A l'entrée dédiée à l'équipe médicale, on doit présenter sa carte pour que la porte s'ouvre et le médecin pourra accéder.

4.4.2 Conditions

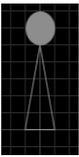
1. L'éclairage de la ville s'allume automatiquement :
 - Si il fait soir l'éclairage s'allume.
 - Sinon il s'éteint.
2. Lorsqu'une personne veut entrer à l'hôpital par la porte dédiée aux médecins, on vérifie en présentant sa carte magnétique :
 - Si cette personne fait partie de l'équipe médicale la porte s'ouvre.
 - Sinon la porte reste fermer.
3. Dans le parking de l'hôpital dédié à l'équipe médicale, si une voiture veut stationner elle vérifie s'il y a des places disponibles grâce à un jalonnement dynamique qui sert à informer les usagers en temps réel sur l'état d'occupation des zones à proximité avec des panneaux dynamiques de signalisation.
 - Si on a des places disponibles, la porte du parking s'ouvre et se referme automatiquement.
 - Sinon la porte reste fermer.
4. chaque place de stationnement est équipée d'un capteur intelligent capable de détecter la présence d'un véhicule et d'informer en temps réel que la place est libre ou

occupée.

- S'il détecte une voiture il devient rouge et transmet de l'information vers le serveur central qui décrémente le nombre de places disponibles pour le stationnement .
 - Sinon le capteur reste vert pour indiquer que la place est disponible.
5. La voiture qui est en marche si elle détecte que le feu-rouge est allumer en rouge elle s'arrête automatiquement, elle ne reprend seulement s'il devient vert.

4.4.3 Paramètres de simulation

4.4.3.1 Définition des agents

Image-Agent	Nom-agent	Propriétés
	Personnes	Breed [personnes personne] Set shape "person" ; ;forme per- sonne Set size 2 ; ; Sa taille set color white ; ; Sa couleur set xcor 8 set ycor 5 ; ; Sa < posi- tion Set heading 90 ; ; la direction
	Eclairage	Breed [eclairages eclairege] set shape "eclairage" set size 8 set heading 180 set color white set xcor -3 set ycor 12
	Cameras	Breed [eclairages eclairege] set shape "cam1" set size 4 set color grey set heading 300 set xcor -16 set ycor -16

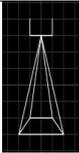
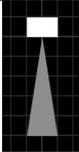
	Dor	Breed [dors dor] set shape "porte" set size 20 set color gray - 3 set xcor 9 set ycor 7 set heading 90
	Voitures	Breed [voitures voiture] set shape "car" set size 4 set color blue set xcor -13 set ycor 0 set heading 90
	Antenne	Breed [antennes antenne] set shape "antennes" set size 20 set heading 90 set color gray set xcor -10 set ycor -13
	Petit antenne	Breed [petitantennes petitantenne] set shape "petitantenne" set size 8 set heading 180 set color grey set xcor -3 set ycor 6
	Capteur	Breed [capteurs capteur] set shape "capture" set size 4 set heading 90 set color green set xcor 13 set ycor 0
	Telephone	Breed [telephone tel] set size 3 set shape "téléphone" set xcor -8 set ycor 9
	Feu tri-color	Breed [feux-rouges feu-rouge] set shape "feu-rouge" set size 8 set color grey set xcor -4 set ycor -4

TABLE 4.2 – Propriétés des agents de la ville intelligente

4.4.3.2 Définition des procédures

1. **Agent personne** : il s'agit d'un citoyen de la ville qui participe à son évolution .

– *Procédure move*

Début

Vérification de la présence d'une personne à côté de la porte de l'hôpital

Si personne= docteur

Accès autorisé, la porte de l'hôpital s'ouvre , le docteur rentre dans l'hôpital

Sinon accès interdit la porte sera fermé

Fin Si

Fin.

– *Procédure go*

Début

Si feu-rouge= rouge **alors**

la personne traverse la route.

Sinon elle s'arrête jusqu'à nouvel ordre.

Fin Si

Fin.

2. **Agent éclairage** : il détecte s'il y a un changement de temps selon lequel il s'allument ou s'éteints

– *Procédure allumer*

Début

Si temps=soir

L'éclairage s'allume

Fin Si

Fin.

– *Procédure éteindre*

Début

Si temps=matin

L'éclairage s'éteint

Fin Si

Fin.

3. **Agent camera** : les caméras sont actives tous le temps (jour et nuit) pour assurer la sécurité de la ville et des citoyens .

– *Procédure sécurité*

Début

Les cameras sont activées

Si la distance entre l'intrus et (la city, l'hôpital,...) < 6 **alors**

La camera envoie un message aux téléphones des agents pour les informer

Sinon Les cameras restent actives sans envoyer des messages

Fin Si

Fin.

4. **Agent jalonnement** : un jalonnement dynamique est installé à côté de le porte du parking détecte la présence d'une voiture près de la porte du parking.

– *Procédure garer*

Début

Si jalonnement = vert **alors**

Si gar = 'garage1' et distance entre la place de stationnement (garage1) et la voiture < 5 **alors**

La porte du parking s'ouvre et le médecin gare sa voiture dans la place indiqué et se referme dès que la voiture sera bien stationner, puis le capteur placé dans le sol change de couleur et devient rouge et décrémente le nombre de places disponible.

Sinon Si gar = 'garage2' et distance entre la place de stationnement (garage1) et la voiture < 5 **alors**

La porte du parking s'ouvre et le médecin gare sa voiture dans la place indiqué et se referme dès que la voiture sera bien stationner, puis le capteur placé dans le sol change de couleur et devient rouge et décrémente le nombre de places disponible.

Sinon Si gar = 'garage3' et distance entre la place de stationnement (garage1) et la voiture < 5 **alors**

La porte du parking s'ouvre et le médecin gare sa voiture dans la place indiqué et se referme dès que la voiture sera bien stationner, puis le capteur placé dans le sol change de couleur et devient rouge et décrémente le nombre de places disponible.

Sinon Si gar = 'garage3' et distance entre la place de stationnement (garage1) et la voiture < 5 **alors**

La porte du parking s'ouvre et le médecin gare sa voiture dans la place indiqué et se referme dès que la voiture sera bien stationner, puis le capteur placé dans le sol change de couleur et devient rouge et décrémente le nombre de places disponible.

Fin Si

Fin Si

Fin Si

Fin Si

Sinon la porte ne s'ouvre pas et la voiture quitte.

Fin Si

Fin.

5. **Agent feu-rouge** : selon la couleur du feu-rouge la voiture démarre ou s'arrête.

– *Procédure stationner*

Début

Si feu-rouge = 'vert' **alors**

La voiture exécute la procédure garer

Sinon La voiture s'arrête jusqu'à nouvel ordre.

Fin Si

Fin.

4.4.4 Présentation de la simulation

Les interfaces de nos applications englobent un ensemble d'options à partir desquelles on peut accéder à nos systèmes, elles comportent notamment des boutons, des sliders, des Choosers, un monotor et le panneau affichant le déroulement de la simulation (actions et déplacements des agents dans leur environnement).

Chaque boutons représenté dans la figure 4.3 permet aux agents d'exécuter une procédure précise.

Setup : exécute la procédure to setup, permet de créer les agents.

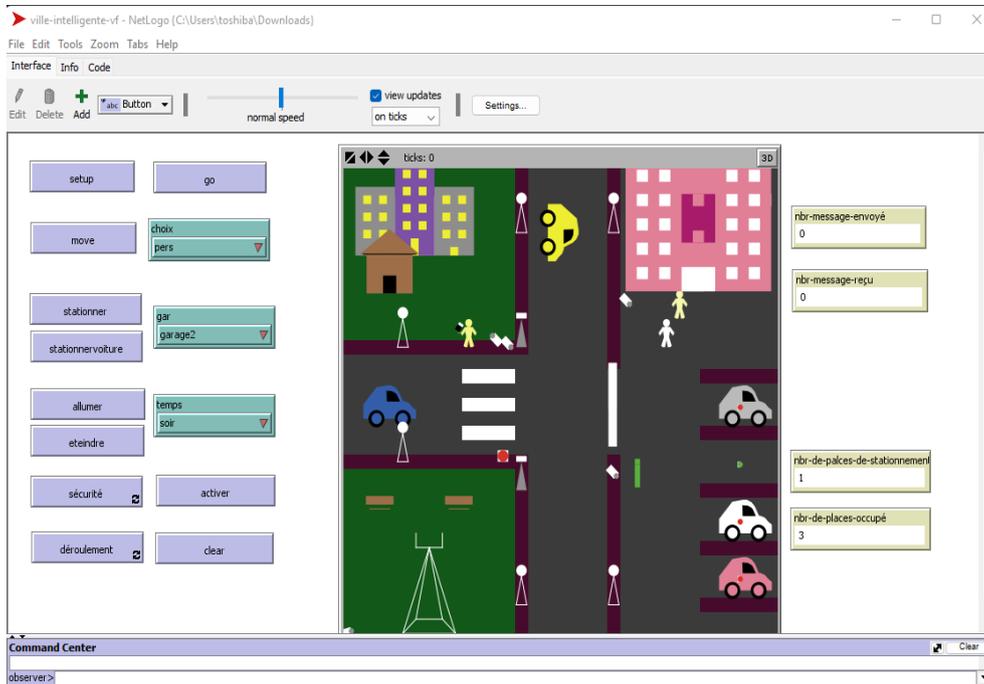


FIGURE 4.3 – Interface de simulation de la ville intelligente

Move : exécute la procédure to move, elle permet de vérifier les personnes autorisées et non autorisées à accéder à l'hôpital.

1. Choix = personne.

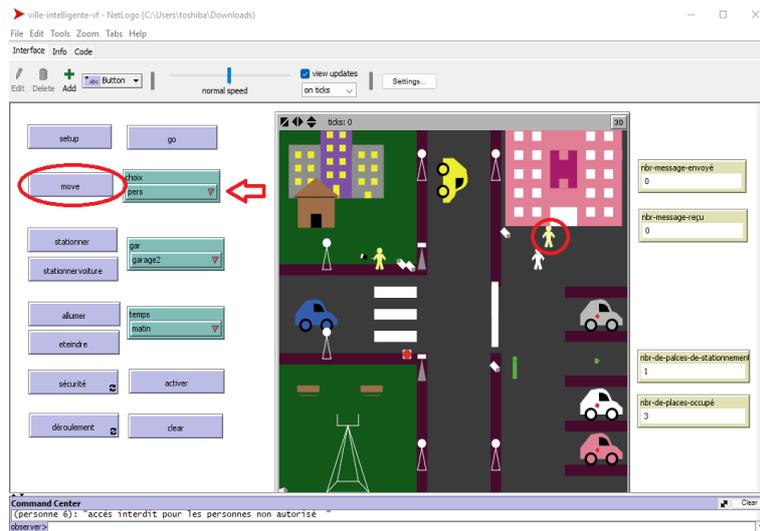


FIGURE 4.4 – Représentation du fonctionnement du bouton move (choix : personne)

2. Choix = docteur.

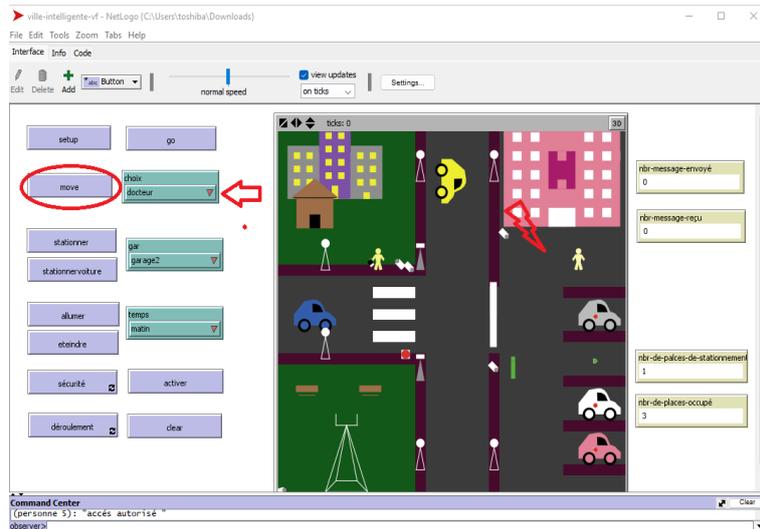


FIGURE 4.5 – Représentation du fonctionnement du bouton move (choix : docteur)

Stationner/Stationnervoiture : exécute la procédure to stationner/stationnervoiture , qui permet d'ouvrir la porte du parking , garer la voiture, refermer la porte et décrémenter le nombre de place de stationnement libre dans le cas où le jallonnement dynamique est en vert sinon la voiture quitte.

1. Bouton stationner

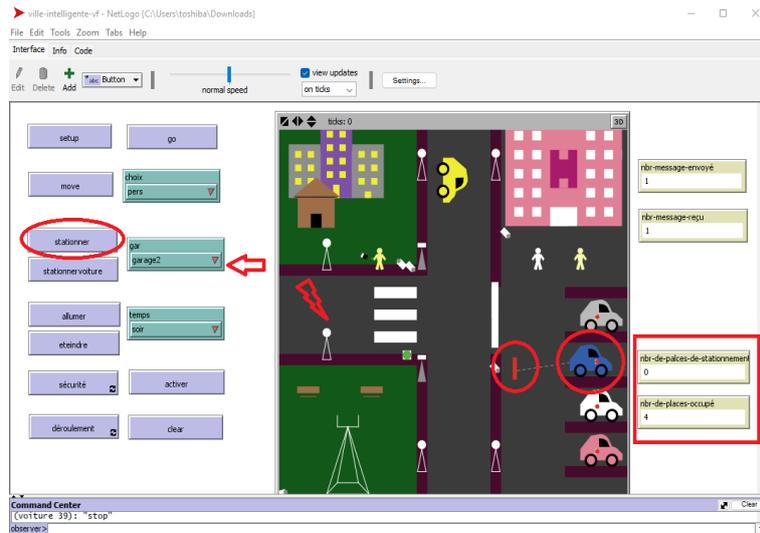


FIGURE 4.6 – Représentation du fonctionnement du bouton stationner

2. Bouton stationnervoiture

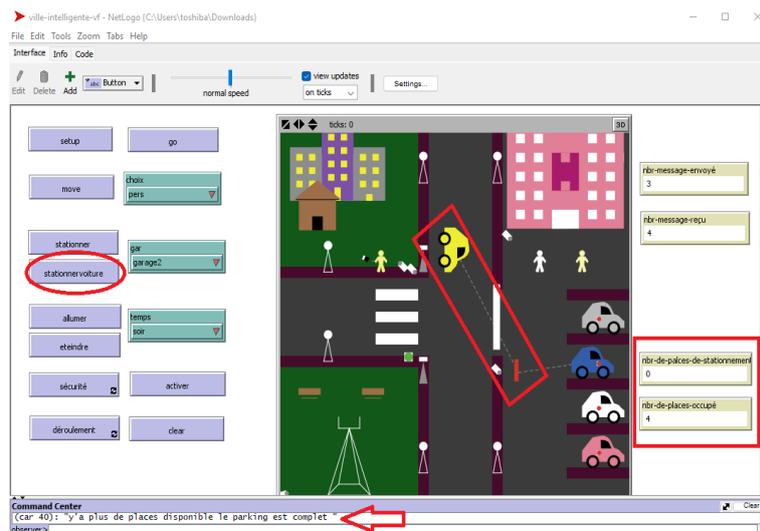


FIGURE 4.7 – Représentation du fonctionnement du bouton stationnervoiture

Allumer : exécute la procédure to allumer , elle permet d'allumer l'éclairage une fois c'est le soir.

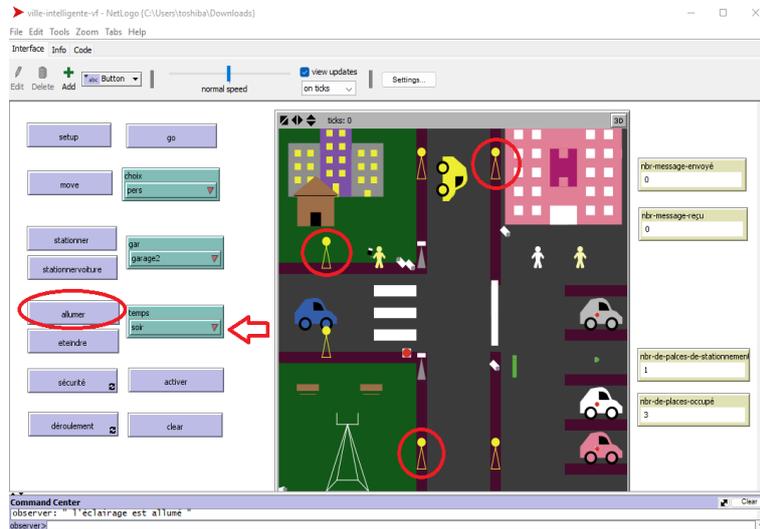


FIGURE 4.8 – Représentation du fonctionnement du bouton allumer

Eteindre : exécute la procédure to éteindre , elle permet d'éteindre l'éclairage une fois c'est le matin.

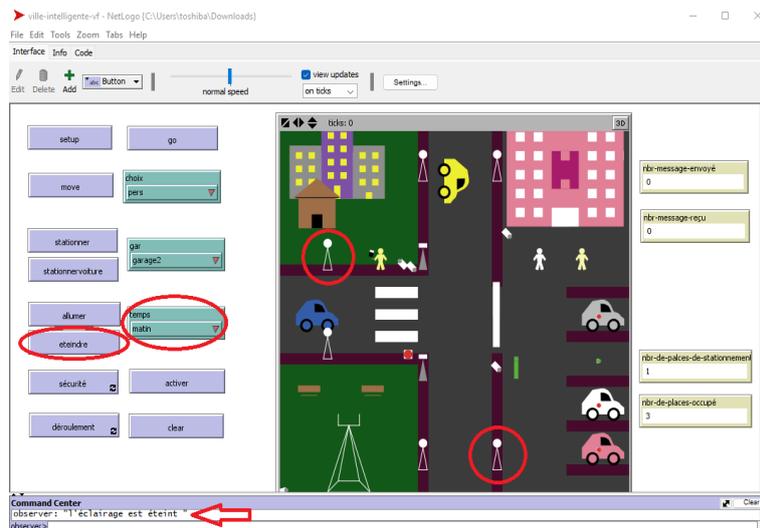


FIGURE 4.9 – Représentation du fonctionnement du bouton eteindre

Sécurité : exécute la procédure to sécurité , qui permet d'allumer les cameras de surveillance.

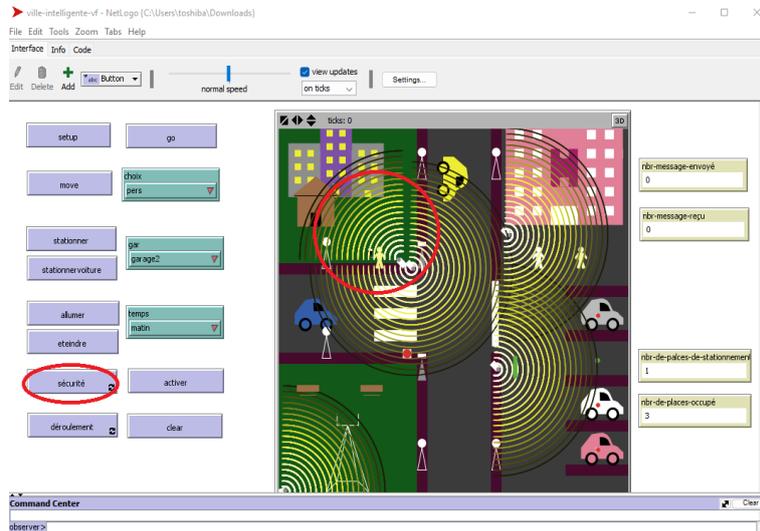


FIGURE 4.10 – Représentation du fonctionnement du bouton sécurité

Activer : exécute la procédure to activer, elle permet de montrer comment se fait la communication entre les différents éléments de la ville en affichant les ondes en utilisant un protocole de communication (5G pour notre cas).

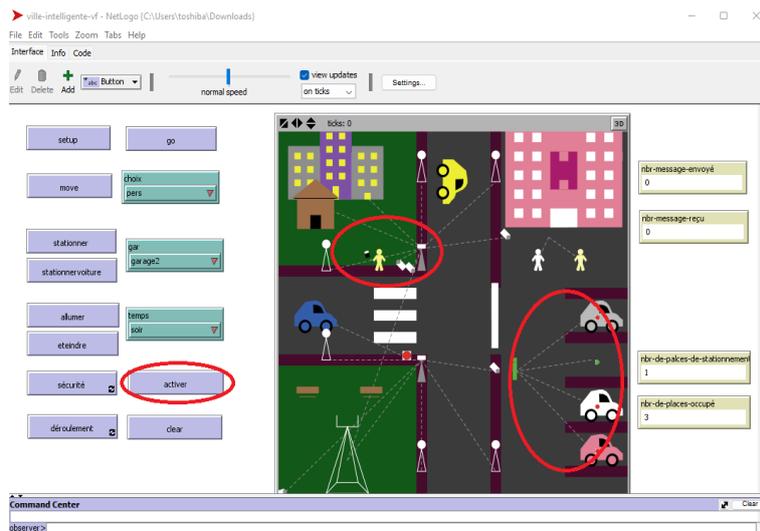


FIGURE 4.11 – Représentation du fonctionnement du bouton activer

4.5 Mise en œuvre de l'Hôpital

4.5.1 Scénario

L'hôpital intelligent possède un espace dédié aux médecins qui fonctionne selon leurs besoins qui veut dire :

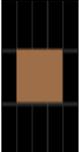
- Lorsqu'un médecin arrive au travail le matin la porte de l'hôpital vérifie s'il s'agit d'un médecin grâce à une borne interactive qui le reconnait par son téléphone, s'il s'agit d'un médecin la porte s'ouvre et se ferme automatiquement dès son entrée.
- La lumière des différentes salles de l'hôpital s'allume dès qu'elles détectent la présence d'une personne.
- Si une personne non autorisée se situe dans cette espace, les caméras de surveillance le captent et envoient un signal au personnel de l'hôpital pour intervenir et ceci pour assurer la sécurité.
- Durant les réunions ou les opérations : les agents radiateurs et climatiseurs s'allument et aussi les fenêtres s'ouvrent automatiquement selon la température du climat.

4.5.2 Conditions

1. Lorsqu'une personne veut entrer à l'hôpital par la porte des médecins, elle vérifie s'il s'agit d'un médecin ou pas
 - Si oui, la porte s'ouvre et se referme automatiquement dès qu'il rentre.
 - Sinon la porte restera fermée pour toute personne non autorisée
2. La lumière dans les différentes salles de l'hôpital s'allume automatiquement dès qu'elle détecte la présence d'un médecin.
3. Si le médecin est dans l'hôpital il a le choix d'entrer ou il veut selon le choix de la porte
4. Selon la température les fenêtres et le climatiseur et les radiateurs s'activent automatiquement
 - Si la température est supérieure à 35 le climatiseur s'allume
 - Si elle est entre 15 et 35 les fenêtres s'ouvrent

4.5.3 Paramètres de simulation

4.5.3.1 Définition des agents

Image-Agent	Nom-agent	Propriétés
	Personne	Breed [personnes personne] set shape "person" set size 2 set color white set xcor 6 set ycor -15
	Camera	breed [cameras camera] set shape "cam" set size 4 set color white set heading 253 set xcor -16 set ycor 10
	Climatiseur	breed [climatiseur clim] set shape "climatiseur" set size 5 set color grey set xcor 16 set ycor 11
	Fenêtre	Breed [fenetres fenetre] set shape "fenet" set size 8 set color brown - 4 set heading 90 set xcor -5 set ycor 11
	Porte	Breed [portes porte] set shape "dor" set size 20 set xcor 5 set ycor -14

	Radiateur	<pre>Breed [radiateurs radiateur] set shape "radiate" set size 6 set color white set xcor 16 set ycor 4</pre>
-----------------------------------------------------------------------------------	-----------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------

TABLE 4.3 – Propriétés des agents de l’hôpital

4.5.3.2 Définition des procédures

1. **Agent personne** : membre de l’équipe médicale .

– *Procédure move*

Début

une personne essaie d’accéder a l’hôpital.

Si personne= docteur

Accès autorisé, la porte de l’hôpital s’ouvre, le docteur rentre à l’hôpital

Sinon accès interdit la porte reste fermé

Fin Si

Fin.

– *Procédure go*

Début

Vérification de la présence de la personne **Si**

choix = porte 1

La personne rentre à la salle de réunion et la lumière s’active automatiquement

Sinon Si choix = porte 2

Si genre = femme

La personne rentre au vestiaire femme, la lumière s’active automatiquement

Sinon la personne ne peut pas rentrer

finSi

Sinon Si choix = porte 3

Si genre = homme

La personne rentre au vestiaire homme, la lumière s’active automatiquement

Sinon la personne ne peut pas rentrer

finSi

Sinon Si choix = porte 4

La personne rentre au bloc opératoire et la lumière s'active automatiquement

Sinon Si choix = porte 5

La personne rentre à la salle de réveil et la lumière s'active automatiquement

Sinon toutes les lumières s'éteignent

Fin Si

Fin Si

Fin Si

Fin Si

Fin Si

Fin Si

Fin.

2. **Agent radiateur** : Les radiateurs s'activent selon la température.

Procédure chauffer Début

Vérification de la température

Si température ≤ 15 alors

les radiateurs s'activent

Sinon Afficher un message d'erreur

Fin Si

Fin.

3. **Agent climatiseur** : Les climatiseurs s'activent selon la température.

Procédure chauffer Début

Vérification de la température

Si température > 30 et choix = climatiseur **alors**

Le climatiseur s'allume

Sinon Afficher un message d'erreur

Fin Si

Fin.

4. **Agent fenêtre** : Les fenêtres s'ouvrent selon la température.

Procédure fenêtre Début

Vérification de la température

Si $15 < \text{température} < 30$ et choix = fenêtres **alors**

Les fenêtres s'ouvrent

Sinon Afficher un message d'erreur

Fin Si

Fin.

5. **Agent camera** : La caméra détecte la présence d'un intrus.

Procédure sécurité Début

Si La caméra détecte la présence d'un intrus **alors**

La caméra envoie un message vers les agents de sécurité de l'hôpital pour les informer

Fin Si

Fin.

4.5.4 Présentation de la simulation

chaque boutons représenté dans la figure 4.12 permet aux agents d'exécuter une procédure précise.

Setup : exécute la procédure to setup, qui permet de créer les agents.

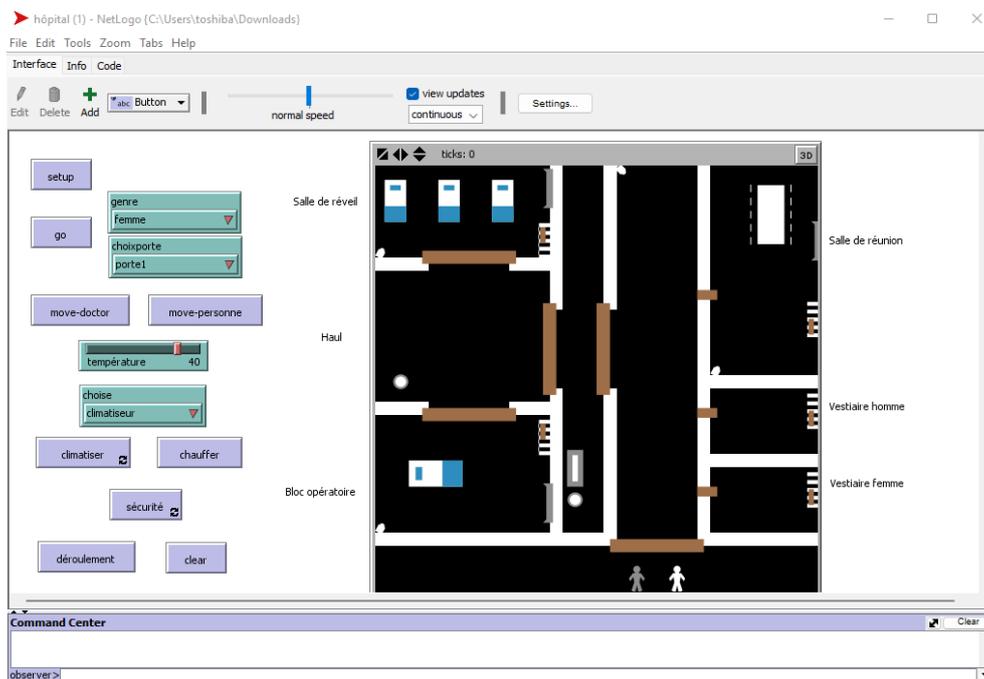


FIGURE 4.12 – Interface de simulation de l'hôpital

move-doctor : exécute la procédure to move-doctor, qui permet à un membre de l'équipe médicale d'accéder à l'hôpital.

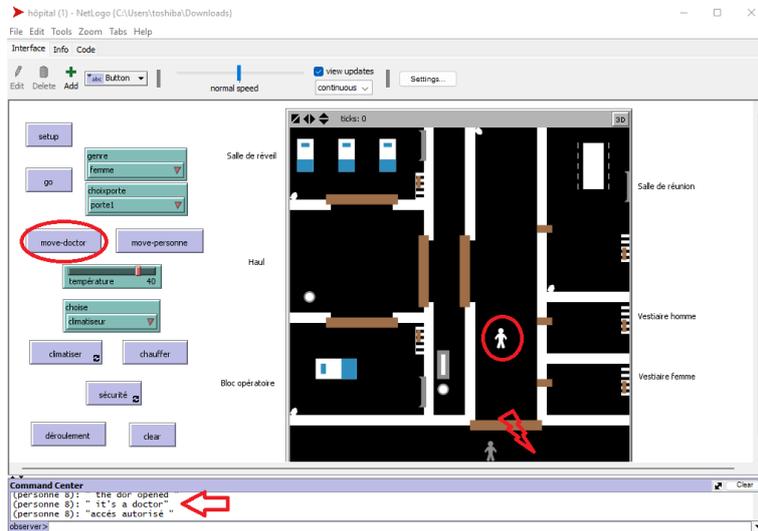


FIGURE 4.13 – Représentation du fonctionnement du bouton move-doctor

move-personne : exécute la procédure to move-personne, qui permet de montrer l'accès interdit aux personnes non-autorisées.

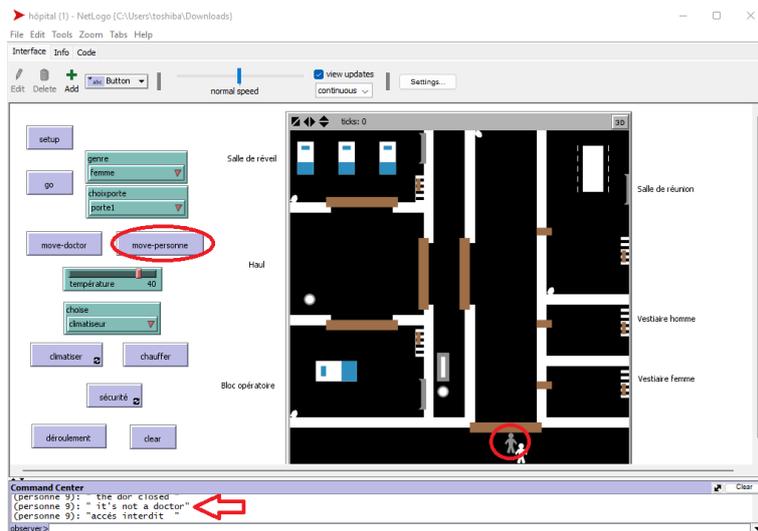


FIGURE 4.14 – Représentation du fonctionnement du bouton move-personne

Chauffer : déroule la procédure to chauffage pour allumer les radiateurs de l'hôpital.

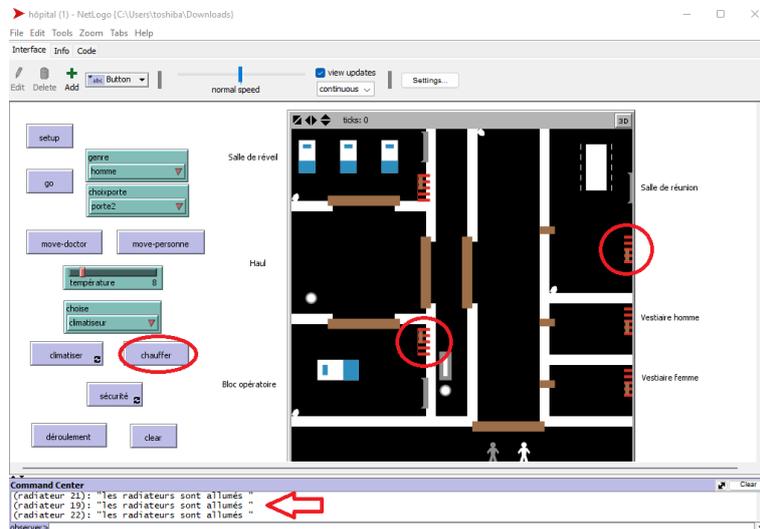


FIGURE 4.15 – Représentation du fonctionnement du bouton chauffer

Climatiser : exécute la procédure to climatiser qui permet d'activer le climatiseur si la température est supérieure à 35, et d'ouvrir les fenêtres si la température est entre 15 et 35.

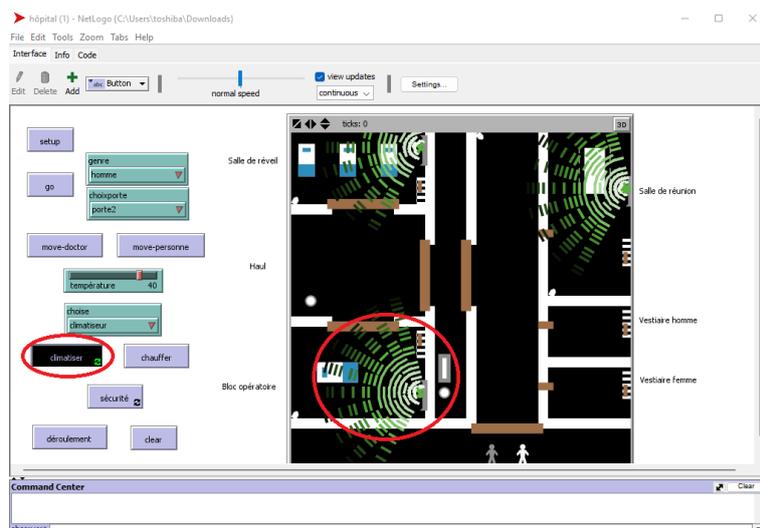


FIGURE 4.16 – Représentation du fonctionnement du bouton climatiser

Sécurité : exécute la procédure to sécurité , qui permet d'allumer les cameras de surveillance.

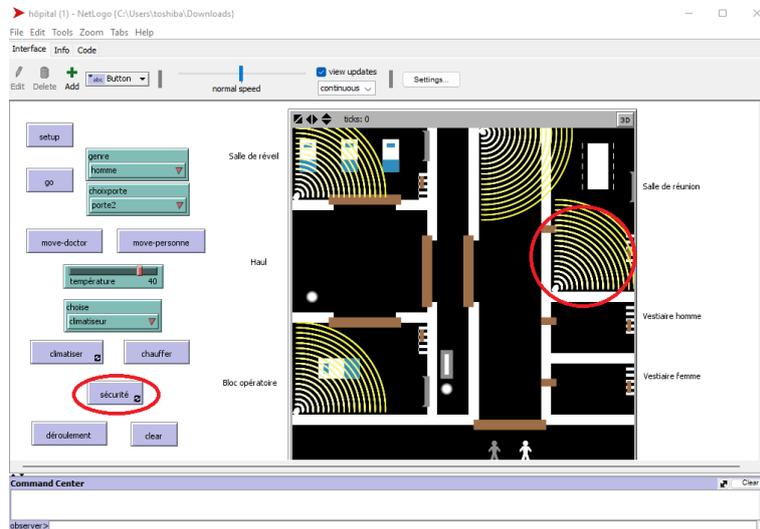


FIGURE 4.17 – Représentation du fonctionnement du bouton sécurité

go : exécute deux procédures ,to go, qui permet le déplacement dans l'hôpital selon le choix (porte1,porte2 ...), et to lumière qui détecte la présence des personnes dans une pièce et allume la lumière.

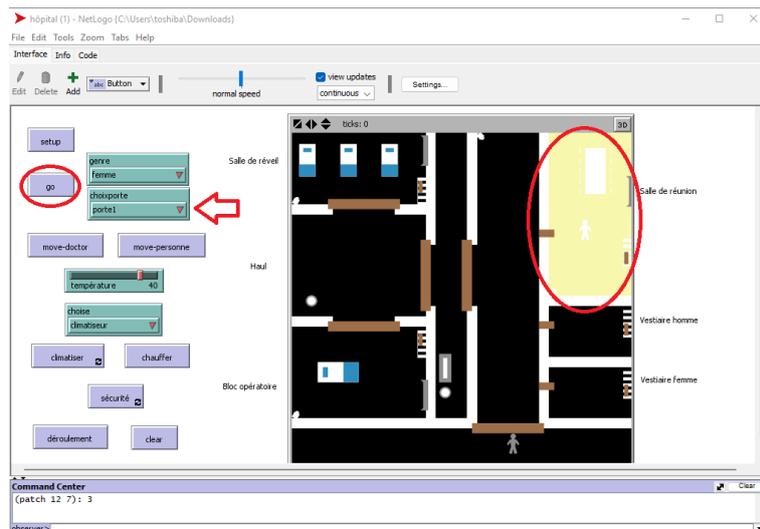


FIGURE 4.18 – Représentation du fonctionnement du bouton go

4.6 Discussion

Après notre étude, nous nous sommes rendu compte que la ville constitue le terrain de jeu privilégié de la 5G, qui a son tour lui permet une organisation plus intelligente et une économie d'énergie considérable.

En utilisant le simulateur NetLogo pour l'implémentation de notre modèle, nous avons constaté la facilité d'apprentissage de son langage de programmation qui ne nécessite pas de le connaître au préalable et une certaine simplicité dans son utilisation et sa manipulation par rapport aux autres simulateurs réseaux traditionnels grâce à son monde composé d'agents qui exécutent des instructions et nous permettent d'obtenir des résultats proches de la réalité.

4.7 Conclusion

La simulation est une étape primordiale pour les chercheurs, et le choix d'un simulateur et de phénomène à simuler repose sur le but que nous voulons atteindre.

Dans ce chapitre nous avons expliqué et présenté notre scénario d'une ville intelligente et son implémentation dans le simulateur multi Agent NetLogo, ainsi que les différents paramètres, les agents. Notre choix a été fixé sur NetLogo essentiellement pour sa rapidité d'apprentissage et son environnement graphique simple.

Conclusion générale

La cinquième génération est une nouvelle génération des standards de la téléphonie mobile. Cette technologie sans fil promet de révolutionner la manière dont le monde communique, Absolument tout, des véhicules autonomes, aux robots chirurgicaux, en passant par les dispositifs de réalité virtuelle augmentée, les drones : on parle de l'« Internet des Objets » (Internet of Things ou IoT).

L'évolution des réseaux de 5G est de plus en plus facilement accessible et constitue un moteur important de la croissance des applications IoT. Cette dernière activée par la 5G (5G-IoT) connectera un nombre massif de dispositifs IoT et contribuera à répondre à la demande du marché en matière de services sans fil afin de stimuler un nouveau développement économique et social.

Dans ce mémoire , nous avons réalisé une simuler l'une des nouvelles applications de la 5G qui se base principalement sur l'internet des objets : *la smart city* en utilisant le simulateur NetLogo, un langage de programmation multi-agents permettant la modélisation de toutes sortes de systèmes complexes évoluant dans le temps par les comportements collectifs produits par les interactions de plusieurs entités (agents) autonomes, dynamiques et auto-organisées. L'objectif de notre mémoire était l'étude des réseaux 5G. Durant ce travail,nous avons constaté que les générations de téléphonie mobile ont été développées pour garantir de meilleures performances, tout en apportant de nouvelles applications, de nouveaux services, ainsi qu'une meilleure gestion.

Ce projet a fait l'objet d'une expérience très intéressante et enrichissante, car il nous a permis d'appliquer nos connaissances en informatique plus particulièrement dans le domaine des réseaux et d'acquérir de nouvelles connaissances concernant la 5G et les avantages qu'elle a apporté a l'IoT.

En guise de perspectives, nous envisagerons de :

- Approfondir notre étude sur les réseaux 5G et la prochaine génération qui la succède.
- Améliorer notre modèle Netlogo d'une ville intelligente en donnant plus de détails.

Bibliographie

- [1] <http://www.informatique-bureautique.com/moodle/mod/page/view.php?id=185>. Consulté le 26/06/2022.
- [2] <http://www.telecom.ulg.ac.be/teaching/notes/total0/elen036/mode174.mn.html>. Consulté le 26/06/2022.
- [3] <http://www.telecom.ulg.ac.be/teaching/notes/total1/elen008/node161.html>. Consulté le 15/05/2022.
- [4] <https://www.tactis.fr/reseaux-cellulaires-mobiles/>. Consulté le 15/05/2022.
- [5] <http://routeur-5g.fr/guide-dachat/comparatif-entre-3g-4g-et-5g/>. Consulté le 06/06/2022.
- [6] <http://www.monpetitforfait.com/toutesles-aides/differences-entre-les-reseaux-mobiles>. Consulté le 01/07/2022.
- [7] <https://www.futura-sciences.com/tech/definitions/informatique-5g-17101/>. Consulté le 01/07/2022.
- [8] <https://www.objetconnecte.com/5g-en-france/>. Consulté le 01/07/2022.
- [9] <http://www.thalesgroup.com/fr/europe/France/dis/mobile/inspiration/5g>.
- [10] <https://www.cerfi.ch/fr/Actualites/5G-danger-exagere-ou-sous-evalue.html>. Consulté le 26/06/2022.
- [11] <https://www.futura-sciences.com/tech/actualites/communication-5g-elle-dangereuse-sante-environnement-vos-donnees-81918/>. Consulté le 26/06/2022.
- [12] <https://www.frandroid.com/telecom/488716-reseau-5g-tout-ce-qui-va-changer-quels-usages-et-pourquoi-la-technologie-est-importante>. Consulté le 03/06/2022.
- [13] <https://www.monpetitforfait.com/comparateur-box-internet/aides/differences-ipv4-ipv6>. Consulté le 01/07/2022.
- [14] <https://www.ringcentral.com/fr/fr/blog/iot/>. Consulté le 01/07/2022.

- [15] <https://wikimemoires.net/2019/09/internet-des-objets-iot-def-sens-objet/>. Consulté le 01/07/2022.
- [16] <https://www.eficiens.com/c-est-quoi-la-5g-millimetrique/>. Consulté le 02/06/2022.
- [17] <https://www.viavisolutions.com/fr-fr/architecture-5g>. Consulté le 02/06/2022.
- [18] <https://www.blueplanet.com/resources/what-is-network-slicing.html>. Consulté le 02/06/2022.
- [19] <https://www.airliquide.com/fr/histoires/industrie/technologie-5g-aussi-simple-que-revolutionnaire>. Consulté le 03/06/2022.
- [20] <https://www.viavisolutions.com/fr-fr/architecture-5g>. Consulté le 22/06/2022.
- [21] <https://www.memoireonline.com/01/09/1878/m-Les-technologies-sans-fil-Le-routage-dans-les-reseaux-ad-hoc-OLSR-et-AODV2.html>. Consulté le 03/06/2022.
- [22] <https://www.journaldunet.fr/web-tech/dictionnaire-de-l-iot/1181267-les-reseaux-iot/?fbclid=IwAR25u7dl-D-oLbaHbuDGu6nAWNxc1ra-VvKAIgVBoNYVvxTzOnjTM-XTiR8>. Consulté le 02/07/2022.
- [23] <https://iot.goffinet.org/iot-securite-mqtt.html>. Consulté le 03/06/2022.
- [24] <https://www.emse.fr/picard/cours/3A/masterWI/sma/>. Consulté le 02/07/2022.
- [25] BANAOUA Abdelhafid. *Contribution à la conception et à l'implémentation d'un langage de spécification formelle dédié à la e-maintenance des systèmes de production par l'approche des systèmes multi-agents*. PhD thesis, Université Ferhat Abbas, Setif, 2006.
- [26] DJIBRILLA INCHA ADAMOU. *Réseaux de collecte de données pour les zones blanches étendues*. PhD thesis, Université Paris Saclay, 2019.
- [27] Fahed Alkhabbas, Romina Spalazzese, and Paul Davidsson. Iot-based systems of systems. In *Swedish Workshop on the Engineering of Systems of Systems (SWESoS), Gothenburg, Sweden (9th of September 2016)*, pages 34–37. Chalmers, 2016.
- [28] Yannick Bouguen, Éric Hardouin, and François-Xavier Wolff. réseaux 4g. 2012.
- [29] Jean-Yves Carabot. La 5g, opportunités et enjeux. *CLUB MÉDIAS et TÉLÉCOMS*, 2021.
- [30] Brahim Chaib-Draa, Imed Jarras, and Bernard Moulin. Systèmes multi-agents : principes généraux et applications. *Edition Hermès*, 242 :1030–1044, 2001.

- [31] Judith S Dahmann. Systems of systems characterization and types. *Systems of Systems Engineering for NATO Defence Applications (STO-EN-SCI-276)*, pages 1–14, 2015.
- [32] Avis de l’ANFR. Evaluation de l’exposition du public aux ondes électromagnétiques 5g. 2019.
- [33] FRANCE NATURE ENVIRONNEMENT. Note de position sur la 5g. 2021.
- [34] Éric Mayeul Olusegun Fafolahan. *Gestion de la mobilité dans les réseaux denses de cinquième génération (5G)*. PhD thesis, Ecole Polytechnique, Montreal (Canada), 2019.
- [35] Philippe FOLLENFANT, Jean-Michel NATAF, Pierre ABALLEA, Louis-Charles VIOSSAT, François-Mathieu ROBINEAU, Henri HAVARD, Vincent MENUET, Charles-Adrien CALVET, Philippe DISTLER, and Benoit LEGAIT. Déploiement de la 5g en france et dans le monde : aspects techniques et sanitaires. 2020.
- [36] Hend Ben Hadji. Les fondamentaux de l’iot. Technical report, Centre d’Etudes et de Recherche des Télécommunications (CERT), Tunisie, 2020.
- [37] J.Klein and H.Vliet. A systematic review of the system of systems architecture search.
- [38] BENHAMZA Karima. *Conception d’un système multi-agents adaptatif pour la résolution de problème*. PhD thesis, Université BADJI MOKHTAR, ANNABA, 2016.
- [39] Monique Liebert-Champagne. Les enjeux de la 5g. *Autorité de régulation des communications électroniques et des postes*, 2017.
- [40] Johan Lukkien. A systems of systems perspective on the internet of things. *ACM SIGBED Review*, 13(3) :56–62, 2016.
- [41] Leo Mendiboure. *Distribution géographique de données dans l’Internet des Véhicules : une approche logicielle et sécurisée utilisant les réseaux cellulaires*. PhD thesis, Université de Bordeaux, 2020.
- [42] Cornelius Ncube, Soo Ling Lim, and Huseyin Dogan. Identifying top challenges for international research on requirements engineering for systems of systems engineering. In *2013 21st IEEE International Requirements Engineering Conference (RE)*, pages 342–344. IEEE, 2013.
- [43] Assane NGOM. *Conception de petits réseaux d’antennes reconfigurables ou Small-Cells pour le standard 5G*. PhD thesis, Université Côte d’Azur, 2019.

- [44] Mohamed Amine OUAMRI. *Optimisation du réseau de téléphonie mobile pour une couverture maximale d'une région urbaine*. PhD thesis, Université de Béjaia-Abderrahmane Mira.
- [45] Olivier Rivaton. *Le routage de l'information dans les réseaux véhiculaires mobiles*. PhD thesis, Université Laval, Québec, 2016.
- [46] Lucas RIVOIRARD. *Modèle d'auto-organisation pour les protocoles de routage dans les réseaux ad hoc de véhicules : application à la perception élargie et à la localisation coopératives*. PhD thesis, Université de Lille, 2018.
- [47] ARSÈNE SABA. *SYSTÈMES MULTI-AGENTS : UNE ANALYSE COMPARATIVE DES MÉTHODOLOGIES DE DÉVELOPPEMENT*. PhD thesis, Université du Québec à Trois-Rivières, 2001.
- [48] SAADAOUI Safa. *Conception d'un système de communication sans fil industriel basé sur la transformée en ondelettes*. PhD thesis, Université de Lorraine, 2019.
- [49] GUEZIZ Safia. *Contribution à la simulation et l'émulation des Réseaux sans fil de dernière génération*. PhD thesis, Université KASDI-MERBAH OUARGLA, 2019.
- [50] Eduardo Silva, Thais Batista, and Flavio Oquendo. On the verification of mission-related properties in software-intensive systems-of-systems architectural design. *Science of Computer Programming*, 192 :102425, 2020.
- [51] Elizabeth Sklar. Software review : Netlogo, a multiagent simulation environment. *Journal of Artificial Life*, 2007.
- [52] SALEH Wassim. *Étude de nouvelles technologies d'antennes pour applications 5G dans la bande millimétrique*. PhD thesis, Université DE NANTES, 2021.

Résumé

La cinquième génération des réseaux mobiles est une nouvelle génération des standards de téléphonie mobile qui s'avère une technologie prometteuse et qui pourra changer la tendance du monde de communication qui est de forte exigence tel que celle des objets connectés. C'est dans ce contexte que s'inscrit le travail présenté dans ce mémoire qui consiste en la réalisation d'une simulation d'une ville intelligente en utilisant Netlogo, ceci après avoir étudié les différentes notions de la 5G et son importance à la croissance de l'internet des objets, qui à son tour est considéré comme un système de systèmes, un groupe d'éléments en interaction, liés entre eux et interdépendants, qui forment un ensemble complexe et unifié. Ce travail a été réalisé en se basant sur les systèmes multi-agents.

Mots clés : 5G, l'internet des objets, simulation, Netlogo, ville intelligente, système multi-agents, système de systèmes.

Abstract

The fifth generation of mobile networks is a new generation of mobile telephony standards which is a promising technology and which will be able to change the trend of the world of communication which is of strong requirement such as that of the connected objects. It is in this context that the work presented in this thesis consists of the realization of a simulation of a smart city using Netlogo, after studying the different concepts of 5G and its importance to the growth of the Internet of Things, which in turn is considered as a system of systems, a group of interacting elements, linked together and interdependent, which form a complex and unified whole. This work has been carried out based on multi-agent systems.

Keywords : 5G, Internet of things, simulation, netlogo, smart city, multi-agent system, system of systems.