



Mémoire de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur

Filière : Génie industriel

Spécialité : Management industriel et logistique

Présenté par :

**BERREZOUG Ghizlene**  
**SALMI Ferial Fatima Zahra**

Thème

**Conception d'un système de traçabilité des  
produits pharmaceutiques par la technologie  
Blockchain**

Soutenu publiquement, le 02/07/2024, devant le jury composé de :

M BRAHAMI Mustapha Anwar	MCA	ESSA. Tlemcen	Président
M BEKADDOUR Akkacha	MCB	ESSA. Tlemcen	Directeur de mémoire
M MALIKI Fouad	MCA	ESSA. Tlemcen	Co- Directeur de mémoire
M MHAMMEDI Mohammed	MAA	ESSA. Tlemcen	Examineur 1
M KARAOUZANE Zoheir	MAA	ESSA. Tlemcen	Examineur 2

Année universitaire : 2023 /2024

---

## Remerciements

*Ce mémoire est le résultat de nombreux efforts et de nombreux sacrifices. Pour cela, nous remercions Dieu de nous avoir donné le courage, la volonté et surtout la santé durant toutes ces années d'études.*

*Nous remercions dans un premier temps nos parents pour leurs conseils et soutien moral durant toutes ces années d'études.*

*Nous exprimons notre profonde gratitude envers notre encadrant, M. Akkacha BEK-KADOUR, pour son soutien inestimable, son expertise et son dévouement tout au long de notre projet. Sa guidance éclairée, sa disponibilité et son encouragement constant ont été des éléments déterminants de notre progression. Nous lui sommes très reconnaissantes pour son accompagnement attentif et son engagement envers notre réussite.*

*Nous souhaitons également exprimer notre profonde gratitude à notre co-encadrant, M. Fouad MALIKI, pour son soutien précieux tout au long de notre projet.*

*Nous tenons également à remercier spécialement notre enseignant M. Mohammed Bennekrouf pour ses soutiens et ses conseils tout au long de notre étude.*

*Un grand remerciement à tous les membres du jury qui nous ont fait l'honneur d'accepter de juger notre travail.*

*Et enfin, nous adressons nos sincères remerciements à tous les professeurs intervenants et à toutes les personnes qui nous ont aidés par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques.*

---

## Dédicaces

*Avec une profonde affection, je dédie humblement ce travail, fruit de mes efforts, à tous ceux qui ont partagé ce chemin avec moi :*

*À ma chère mère, Samia, qui m'a entourée d'amour, de tendresse et de soutien. Ta force et ta bienveillance m'ont donné le courage de poursuivre mes rêves.*

*À la mémoire de mon défunt père, Belkacem, parti très jeune. De là où tu es, ton amour et ta sagesse m'ont guidée tout au long de ma vie, me donnant la force de réaliser mes rêves d'enfance.*

*À mon cher petit frère, Moncef, dont la joie de vivre et la présence joyeuse ont été une source constante de motivation et de réconfort.*

*À mes grands-parents, Anouar et Houria, pour leur amour inconditionnel et leurs prières incessantes qui m'ont donné la force de persévérer.*

*À mes oncles, Samir, Adil, et Chakib, et à mes tantes, Ilhem et Nacera. Votre soutien et votre présence ont toujours été des piliers importants dans ma vie.*

*À mes petites cousines, Iness et Miral, et à mes petits cousins, Chiheb, Elhadi, et Anouar, qui ont illuminé ma vie par leur innocence et leur amour.*

*À mon fiancé, Riad, pour son soutien inestimable. Ton encouragement et ta confiance en moi ont été une source de motivation constante. Merci de croire en moi et de m'inspirer à être la meilleure version de moi-même.*

*À mes beaux-parents, à mes beaux-frères et à ma belle-sœur, Aya.*

*À ma meilleure amie Hadjer LOUZIM, ta présence dans ma vie a été une source de bonheur et de soutien inestimable. Ta gentillesse et ta sagesse ont rendu chaque moment partagé encore plus précieux. Tu as été à mes côtés dans les hauts comme dans les bas, apportant toujours réconfort et encouragement. Merci pour ton amitié infailible et pour être la personne extraordinaire que tu es. Je suis profondément reconnaissante de t'avoir comme meilleure amie.*

*À mes chères amies Razane BELARBI, Manel ADDOU et Manel SARI, votre amitié a illuminé ma vie d'une manière incomparable. Merci à chacune de vous pour votre présence, votre soutien et les souvenirs merveilleux que nous avons créés ensemble. Vous êtes des amies exceptionnelles et je suis profondément reconnaissante de vous avoir dans ma vie.*

*À mon binôme, Ferial, avec qui j'ai partagé tant de moments de travail et de complicité. Ton soutien et ta détermination ont rendu cette aventure académique enrichissante et mémorable. Je te souhaite tout le succès possible pour l'avenir.*

---

*À M. Fouad MALIKI, mon encadrant et mon enseignant, je tiens à exprimer ma profonde gratitude pour vos conseils avisés, votre encadrement rigoureux et votre soutien constant au cours de mes années d'études. Votre expertise et votre dévouement ont été essentiels à la réussite de notre travail. Grâce à votre patience et à votre persévérance, j'ai pu développer des compétences professionnelles solides et atteindre un haut niveau de compétence. Votre influence positive a enrichi mes connaissances académiques et façonné mon parcours professionnel. Pour tout cela, je vous suis infiniment reconnaissante.*

*À mes collègues de la GI, pour leur camaraderie et toutes les expériences partagées durant ces années. Vous avez rendu ce voyage académique inoubliable.*

*B. Ghizlène*

---

## Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail avec un amour profond :*

*À ma mère, Nouria TRIKI YAMANI, qui m'a donné tant de tendresse et d'espoir. À la source de l'amour, qui m'a donné sa force et qui m'a bénie de ses prières.*

*À mon père Yahya SALMI, mon soutien dans la vie, qui m'a enseigné, soutenu et conduit à la gloire. Papa, tu es mon tout dans la vie. Que Dieu les protège, à moi.*

*À mes chères sœurs, Aya et Jihane et mon cher frère Mohammed qui m'ont apporté un encouragement permanent et un soutien moral tout au long de mes études.*

*À mes chères grande-mères, Je souhaite exprimer toute ma gratitude pour votre amour infini, votre sagesse précieuse et votre présence dans ma vie.*

*À mes grand-pères, même si vous n'êtes plus physiquement parmi nous, votre présence reste gravée dans ma mémoire et votre influence continue de guider mes pas.*

*À mon cher oncle Abdelkader CHIALI, à Tata Hafida, à mes chères sœurs et cousines Fatima, Ahlem et Nesrine, qui ont enrichi ma vie de leur présence et de leur amour, un immense merci pour tout.*

*À Tata Leila, dont la rencontre a été un véritable cadeau du destin. Je suis profondément reconnaissante d'avoir eu la chance de croiser votre chemin. Votre présence bienveillante et vos conseils avisés ont illuminé ma vie d'une manière inattendue mais tellement précieuse.*

*À mes copines Hadjer LOUZIM, Razane BELARBI et Manel SARI, Je tiens à vous exprimer toute ma gratitude pour votre soutien constant et votre présence précieuse dans ma vie. Chacune de vous apporte une lumière unique à mes journées, remplissant nos moments ensemble de rires contagieux, de conversations enrichissantes et d'un amour qui dépasse les mots.*

*À mon binôme et sœur Ghizlène, de notre première rencontre à la rédaction de ce mémoire, nous avons parcouru un long chemin ensemble. Je vous souhaite beaucoup de succès pour l'avenir.*

*À mes amies, Salah, Mohiedine, Nassim, Youcef et Nadir qui m'ont toujours aidé et encouragé.*

*À les GI's, Je tenais à vous exprimer ma sincère reconnaissance pour toutes les expériences partagées et les souvenirs créés ensemble au cours de notre parcours.*

*À M. Akkacha BEKKADOUR, mon directeur de mémoire, je tiens à vous exprimer ma plus profonde gratitude pour le soutien et l'encadrement que vous m'avez apportés tout au long de la réalisation de ce mémoire.*

---

*À M. Fouad MALIKI, je souhaite adresser mes remerciements pour son enseignement et ses précieux conseils tout au long de cette période. À chaque étape de ce parcours, votre expertise, votre patience et vos conseils avisés ont été inestimables pour le développement de mes compétences et la réussite de mon travail. Vous avez su me guider avec bienveillance et rigueur, ce qui m'a permis de surmonter les difficultés et d'atteindre mes objectifs.*

*À toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.*

*Merci.*

*S. Ferial*

# Table des matières

Liste des figures.....	i
Liste d'abréviation.....	ii
Introduction générale.....	1
Chapitre 1. La traçabilité dans la chaîne d'approvisionnement pharmaceutique.....	3
1.1 Introduction.....	3
1.2 La chaîne d'approvisionnement.....	3
1.3 La chaîne logistique.....	4
1.4 Qu'est-ce que c'est la gestion des chaînes d'approvisionnement et la gestion logistique?.....	4
1.5 Les types de flux dans la chaîne d'approvisionnement.....	4
1.6 La traçabilité.....	5
1.7 Qu'est-ce qui a motivé l'initiative de traçabilité?.....	5
1.8 La traçabilité d'une chaîne d'approvisionnement.....	6
1.9 Les trois aspects de la traçabilité.....	8
1.10 La chaîne d'approvisionnement pharmaceutique.....	9
1.11 Les parties prenantes de la chaîne d'approvisionnement pharmaceutique et leurs relations.....	10
1.12 Les éléments à tracer.....	11
1.13 Les objectifs de la traçabilité.....	12
1.14 Conclusion.....	13
Chapitre 2. Généralité sur la technologie Blockchain.....	14
2.1 Introduction.....	14
2.2 Définition de la Blockchain.....	14
2.2.1 Le problème résolu par la Blockchain.....	15
2.3 L'histoire de la technologie Blockchain.....	15
2.4 Le fonctionnement de la Blockchain du Bitcoin.....	17
2.5 Concepts et définitions liées à la technologie Blockchain.....	20
2.6 Les caractéristiques de la technologie Blockchain.....	21
2.7 Les mécanismes de validation de blocs (les consensus).....	23
2.7.1 Proof Of Work :.....	23
2.7.2 Proof Of Stake :.....	24
2.7.3 Proof Of Authority :.....	24
2.8 Différents modèles de Blockchain.....	24
2.8.1 Blockchain publique :.....	24
2.8.2 Blockchain privée :.....	25
2.8.3 Blockchain semi-privée :.....	25
2.9 Les types de systèmes.....	25
2.9.1 Système centralisé :.....	25
2.9.2 Système décentralisé :.....	25
2.9.3 Système distribué :.....	26

2.10	La Blockchain dans la chaîne d'approvisionnement . . . . .	26
2.11	Implémentation de la Blockchain dans l'industrie pharmaceutique . . . . .	27
2.12	Les avantages de la Blockchain . . . . .	28
2.13	Les inconvénients de la Blockchain . . . . .	29
2.14	État de l'art . . . . .	29
2.14.1	L'avancement de la Blockchain . . . . .	29
2.14.2	Les projets réalisés . . . . .	31
2.14.3	Les domaines d'application futurs de la blockchain . . . . .	32
2.15	Conclusion . . . . .	32
Chapitre 3.	Mise en place du système de traçabilité . . . . .	34
3.1	Introduction . . . . .	34
3.2	Conception du système de traçabilité visé . . . . .	34
3.2.1	Conception du diagramme de cas d'utilisation . . . . .	35
3.2.2	Conception de la base de données . . . . .	41
3.2.3	Modélisation de l'interface de l'application . . . . .	51
3.3	Modélisation générale du système de traçabilité blockchain . . . . .	53
3.4	Réalisation et implémentation du système de traçabilité . . . . .	56
3.4.1	Implémentation de la base de données . . . . .	56
3.4.2	Implémentation de la Blockchain . . . . .	64
3.4.3	Implémentation de l'interface . . . . .	66
3.5	Conclusion . . . . .	72
Conclusion générale	. . . . .	73
Bibliographie	. . . . .	75



# Table des figures

1.1	Les types de flux dans la chaîne d'approvisionnement. . . . .	5
1.2	La traçabilité descendante et la traçabilité ascendante. . . . .	7
1.3	Traçabilité en amont. . . . .	8
1.4	Traçabilité en aval. . . . .	8
1.5	Représentation d'une chaîne d'approvisionnement pharmaceutique. . . . .	9
1.6	Les parties prenantes de la chaîne d'approvisionnement pharmaceutique et leurs relations. . . . .	11
2.1	Les principaux acteurs de la communauté cypherpunk. . . . .	16
2.2	Représentation d'une chaîne de blocs. . . . .	17
2.3	La structure d'un bloc et le rôle du hash. . . . .	18
2.4	Processus de création des blocs et effectuation d'une transaction dans une Blockchain. . . . .	19
2.5	La notion de réseau pair-à-pair. . . . .	20
2.6	Représentation du partage de données en adoptant une approche centralisée et décentralisée. . . . .	22
2.7	Les trois consensus du bitcoin. . . . .	23
2.8	Représentation des systèmes centralisés, décentralisés et distribués. . . . .	26
2.9	La Blockchain pour la traçabilité des médicaments. . . . .	28
3.1	Exemple explicatif du diagramme de cas d'utilisation du fournisseur. . . . .	36
3.2	Diagrammes de cas d'utilisation du fournisseur. . . . .	37
3.3	Diagrammes de cas d'utilisation du laboratoire. . . . .	37
3.4	Diagrammes de cas d'utilisation du grossiste répartiteur. . . . .	38
3.5	Diagrammes de cas d'utilisation du pharmacien. . . . .	39
3.6	Diagrammes de cas d'utilisation du livreur. . . . .	40
3.7	Diagrammes de cas d'utilisation du client. . . . .	40
3.8	Diagrammes de cas d'utilisation du gouvernement. . . . .	41
3.9	Modèle conceptuel de données Fournisseur Laboratoire. . . . .	42
3.10	Modèle conceptuel de données Laboratoire Grossiste. . . . .	43
3.11	Modèle conceptuel de données Grossiste Pharmacie. . . . .	44
3.12	Modèle conceptuel de données Pharmacie Client. . . . .	45
3.13	Modèle conceptuel de données identification. . . . .	46
3.14	Exemple de conversion d'une entité. . . . .	47
3.15	Exemple de règle de conversion d'une association de type NN. . . . .	47
3.16	Exemple de règle de conversion d'une association de type 1N. . . . .	48
3.17	Exemple de règle de conversion d'une association de type 11. . . . .	48
3.18	Modèle logique de donnée fournisseur laboratoire. . . . .	49

3.19	Modèle logique de donnée laboratoire grossiste. . . . .	50
3.20	Modèle logique de donnée grossiste pharmacie. . . . .	50
3.21	Modèle logique de donnée pharmacie client. . . . .	51
3.22	Modèle logique de données identification . . . . .	51
3.23	Schématisation de l'interface. . . . .	52
3.24	Schéma général de la blockchain du système de traçabilité. . . . .	54
3.25	Diagramme de classe de la blockchain. . . . .	55
3.26	Diagramme de séquence illustrant l'ajout d'un nouveau bloc. . . . .	55
3.27	Diagramme de séquence illustrant l'existence d'un bloc. . . . .	56
3.28	La table compte. . . . .	57
3.29	La table fournisseur. . . . .	57
3.30	La table lot_pf. . . . .	57
3.31	La table bl_fl. . . . .	58
3.32	Exemple d'une fonction nommée Verifier_compte. . . . .	58
3.33	Exemple d'une fonction nommée bloc_vider. . . . .	59
3.34	Exemple d'une fonction nommée ajouter_compte. . . . .	59
3.35	Exemple d'une procédure stockée nommée Modifier_client_tout. . . . .	60
3.36	Exemple d'une procédure stockée nommée Recherche_livreur_tout. . . . .	61
3.37	Exemple d'une procédure stockée nommée Ajouter_fournisseur. . . . .	61
3.38	Exemple d'une procédure stockée nommée tout_lotmp. . . . .	62
3.39	Exemple d'une procédure stockée nommée Nouveau_BL_FL. . . . .	63
3.40	Exemple d'une procédure stockée nommée modifier_bl_fl_liv. . . . .	63
3.41	Exemple d'une procédure stockée nommée recherche_livreur_id. . . . .	64
3.42	La page d'enregistrement et de connexion. . . . .	67
3.43	L'interface de visualisation et de modification des informations personnelles du grossiste. . . . .	68
3.44	L'interface de gestion des emballages par le laboratoire. . . . .	69
3.45	L'interface de gestion de livraison par le livreur vers le laboratoire. . . . .	70
3.46	L'interface de traçabilité de livraison par le fournisseur. . . . .	71

# Liste d'abréviation

<b>Abréviation</b>	<b>Signification</b>
CPU	Central Processing Unit
IBM	International Business Machines Corporation
P2P	Peer-to-Peer
PoS	Proof of Stake
PoW	Proof of Work
IoT	Internet of Things
SWIFT	Society for Worldwide Interbank Financial Telecommunication
RFID	Radio-Frequency Identification
EPC	Electronic Product Code
IPFS	InterPlanetary File System
EVM	Ethereum Virtual Machine
DAG	Directed Acyclic Graph

# Introduction générale

Dans un monde où la sécurité et l'efficacité des produits pharmaceutiques sont d'une importance capitale, la traçabilité dans la chaîne d'approvisionnement de ces produits joue un rôle crucial. Ce projet de fin d'études aborde cette problématique en proposant une solution innovante basée sur la technologie Blockchain pour assurer une traçabilité optimale des produits pharmaceutiques.

La chaîne d'approvisionnement pharmaceutique est constituée de multiples acteurs : fournisseur, laboratoire, grossiste, pharmacie et livreur. Chacun de ces acteurs joue un rôle déterminant dans la livraison des médicaments aux patients. La complexité de cette chaîne requiert un système de traçabilité rigoureux pour garantir l'authenticité et la qualité des produits, prévenir la contrefaçon, et assurer la transparence et la sécurité à chaque étape.

La Blockchain, en tant que registre distribué, offre des caractéristiques uniques telles que l'immutabilité, la décentralisation et la transparence, qui sont essentielles pour relever les défis de la traçabilité. En intégrant cette technologie, il devient possible de créer un système où chaque transaction est enregistrée de manière sécurisée et vérifiable, permettant un suivi exhaustif des produits pharmaceutiques depuis leur fabrication jusqu'à leur distribution finale.

Ce PFE se penche sur l'étude approfondie des besoins de traçabilité dans la chaîne d'approvisionnement pharmaceutique, l'analyse des fonctionnalités offertes par la Blockchain, et la conception d'un système de traçabilité basé sur cette technologie. La méthodologie adoptée inclut la conception, la modélisation et la mise en œuvre d'un prototype fonctionnel, démontrant ainsi les bénéfices tangibles d'une telle solution dans l'industrie pharmaceutique.

Pour concrétiser ces concepts, nous avons développé une application de traçabilité innovante qui utilise la Blockchain pour enregistrer et suivre chaque étape du cycle de vie des produits pharmaceutiques. Cette application permet à tous les acteurs de la chaîne d'approvisionnement d'accéder à des informations fiables et en temps réel sur les produits, depuis la production jusqu'à la livraison au consommateur final. Elle offre une interface conviviale pour la saisie et la consultation des données, et garantit une transparence totale grâce à l'immutabilité des enregistrements Blockchain.

Ce manuscrit est une présentation écrite du travail mené dans le but de répondre aux objectifs visés. Il englobe toutes les étapes nécessaires allant de l'étude théorique de la traçabilité de la chaîne d'approvisionnement pharmaceutiques par la technologie Blockchain jusqu'à la réalisation du système conçu en passant par l'analyse et la modélisation du réel. Dans ce contexte, le mémoire est divisé en trois chapitres avec une introduction générale et une conclusion générale.

Dans le premier chapitre, nous avons présentés les différentes définitions liées aux notions générales de chaîne d'approvisionnement et de traçabilité, ainsi que les parties prenantes dans la traçabilité de la chaîne d'approvisionnement pharmaceutique et ses objectifs.

Le deuxième chapitre vise à présenter l'utilité de la technologie blockchain dans la traçabilité des produits pharmaceutiques. Il commence par la définition de la technologie blockchain et ses concepts, ensuite, il montre les avantages de l'utilisation de cette technologie pour le suivi de la chaîne d'approvisionnement pharmaceutique. Enfin, un état de l'art de l'application de la technologie blockchain dans l'industrie, notamment l'industrie pharmaceutique est décrit.

Dans le dernier chapitre nous avons décrit les différentes étapes de modélisation et réalisation de notre système de traçabilité. La première étape est l'étape de conception dans laquelle nous avons présenté les diagrammes liés au fonctionnement du système, les modèles de la base de données et le schéma général de l'interface de l'application visée. Dans la deuxième étape nous avons illustré le modèle général de notre système de traçabilité blockchain. La dernière étape est une capture des éléments composants le système de traçabilité qui sont : la base de données, la blockchain et l'interface de l'application web.

En résumé, ce projet vise à démontrer comment notre application de traçabilité basée sur la Blockchain peut transformer la gestion des produits pharmaceutiques, en renforçant la confiance des consommateurs, en améliorant l'efficacité des processus logistiques, et en assurant la conformité aux réglementations en vigueur.

# Chapitre 1

## La traçabilité dans la chaîne d’approvisionnement pharmaceutique

### 1.1 Introduction

Dans l’industrie pharmaceutique, la traçabilité des produits, en particulier des médicaments, revêt une importance cruciale pour garantir leur qualité, leur sécurité et leur efficacité. elle implique de suivre le parcours de chaque médicament depuis sa fabrication jusqu’à sa distribution et sa dispensation aux patients.

Ce processus permet d’identifier et de retracer chaque étape de la chaîne d’approvisionnement, offrant ainsi une transparence totale sur l’origine et le cheminement de chaque produit pharmaceutique. Grâce à une traçabilité efficace, les entreprises pharmaceutiques peuvent mieux contrôler la qualité de leurs produits, prévenir la contrefaçon, répondre rapidement aux problèmes de sécurité et de conformité, et garantir la santé et le bien-être des patients.

Dans ce chapitre, nous aborderons la définition de la chaîne d’approvisionnement ainsi que celle de la logistique, et nous mettrons en lumière la différence entre les deux. Ensuite, nous définirons la traçabilité de la chaîne d’approvisionnement, en examinant ses différents types et aspects. Nous explorerons également la chaîne d’approvisionnement pharmaceutique et ses parties prenantes, puis nous discuterons des objectifs de la traçabilité.

### 1.2 La chaîne d’approvisionnement

La chaîne d’approvisionnement est un réseau complexe et interconnecté de différentes étapes et acteurs impliqués dans la production et la distribution de biens et services. Elle commence par l’approvisionnement en matières premières, passe par la fabrication et la transformation, et se termine par la distribution des produits finis aux consommateurs. Chaque maillon de cette chaîne joue un rôle crucial pour assurer la fluidité, la qualité et l’efficacité du processus global.

La chaîne d’approvisionnement, comme définie par Ellram en 1991 : est un réseau d’entreprises en interaction dont l’objectif est de livrer un produit ou un service à l’utilisateur final, en intégrant les flux à partir des matières premières jusqu’à la livraison du produit fini.[9]

### 1.3 La chaîne logistique

Une chaîne logistique peut être définie comme étant : Un réseau d'installations qui assure les fonctions d'approvisionnement en matières premières, de transformation de ces matières premières et composants en produits finis, et de distribution du produit fini vers le client.[9]

La logistique est une partie de la chaîne d'approvisionnement qui consiste à maîtriser les flux physique et d'information dans une entreprise, cela grâce aux ressources informatiques disponibles, des méthodes et des processus. La logistique se concentre essentiellement sur l'apport des produits finis à son consommateur final au moindre coût et avec la meilleure qualité. Parmi les activités concernant la logistique, nous trouverons la réception, le stockage, la préparation et l'expédition des produits.[18]

### 1.4 Qu'est-ce que c'est la gestion des chaînes d'approvisionnement et la gestion logistique ?

La gestion des chaînes d'approvisionnement et la gestion logistique sont deux domaines étroitement liés mais distincts dans le monde de la logistique et de la planification stratégique des entreprises. La première englobe la planification stratégique et opérationnelle de toutes les activités liées à l'approvisionnement, à l'acquisition de produits et à la gestion logistique, en coordonnant divers acteurs le long de la chaîne. En revanche, la gestion logistique se concentre spécifiquement sur la planification, la mise en œuvre et le contrôle des flux de produits, de services et d'informations entre les points de production et de consommation, agissant comme le pilier opérationnel de la gestion des chaînes d'approvisionnement.[21]

### 1.5 Les types de flux dans la chaîne d'approvisionnement

La chaîne d'approvisionnement est constituée de trois flux :

- Le flux d'informations fait référence à toutes les informations qui circulent dans la chaîne d'approvisionnement. Ce flux contient par exemple les caractéristiques d'un produit, les informations liées aux fournisseurs, les stratégies d'approvisionnement comme les délais et les prix, les informations liées aux prestataires, l'historique des ventes, etc.
- Le flux physique concerne tous les déplacements de la marchandise, le stockage et le transport de celle-ci.
- Le flux financier concerne les mouvements de fonds autour des fournisseurs et au sein de l'entreprise.

La coordination appropriée de ces trois flux permettra de satisfaire les besoins des clients.[18]

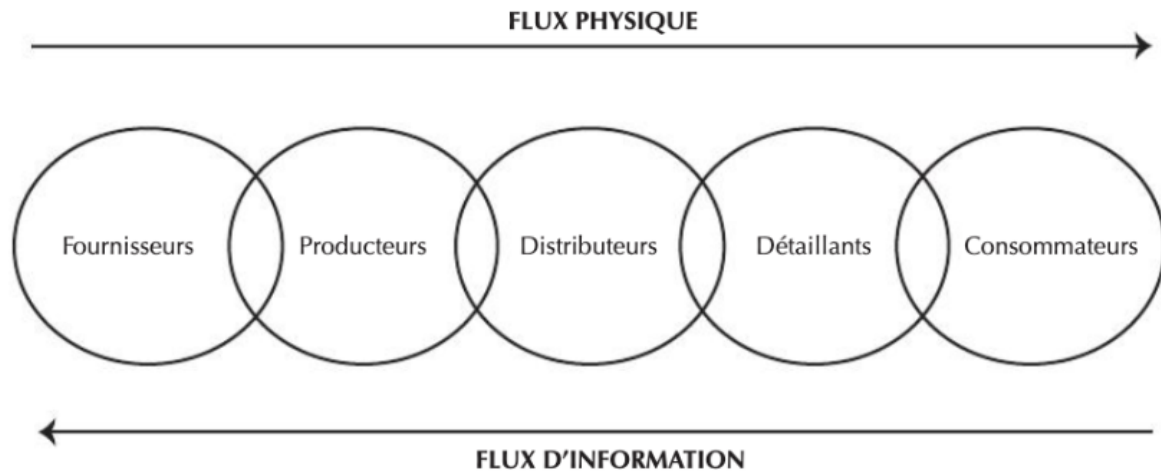


FIGURE 1.1 – Les types de flux dans la chaîne d'approvisionnement.

## 1.6 La traçabilité

Le processus de traçabilité est défini par la norme ISO 9000 : 2015 comme : « la technique qui permet de retrouver l'historique, la mise en œuvre et l'emplacement d'un objet au moyen d'une identification ». [18]

La traçabilité revêt une importance particulière dans plusieurs autres secteurs :

- Dans l'alimentation et les médicaments, où elle est souvent appelée « suivi de lot » assurant ainsi la sécurité et la qualité des produits destinés à la santé humaine.
- Dans les produits agroalimentaires, où elle garantit la qualité et la sécurité des aliments tout au long de la chaîne d'approvisionnement.
- Dans le traitement des produits chimiques ou des déchets, où elle permet de suivre la responsabilité du producteur jusqu'à leur élimination, assurant ainsi une gestion sûre et responsable de ces produits.[14]

## 1.7 Qu'est-ce qui a motivé l'initiative de traçabilité ?

L'initiative de traçabilité a été motivée par plusieurs facteurs dont l'apparition de crises sanitaires majeures dans les années 1980 telles que la fièvre aphteuse et la crise de la vache folle. Ces crises ont mis en évidence les risques pour la santé publique liés à la propagation de maladies animales et à la consommation de produits contaminés.

En réponse à ces crises, il est devenu impératif de mettre en place des systèmes permettant de suivre et de tracer les produits tout au long de leur parcours, depuis leur production jusqu'à leur consommation finale. Cela permet non seulement de garantir la sécurité des consommateurs en identifiant et en retirant rapidement les produits contaminés du marché mais aussi de renforcer la confiance des consommateurs dans les systèmes



de production alimentaire et de santé.

Initialement, l'objectif principal était de contrôler les flux de marchandises au sein de la chaîne de production jusqu'à l'acheminement des produits finis. Cependant, avec le temps, cette initiative s'est étendue pour inclure non seulement les produits alimentaires, mais aussi les médicaments, les dispositifs médicaux, les produits chimiques, et d'autres biens de consommation, dans le but de garantir leur qualité, leur sécurité et leur conformité aux normes réglementaires.

## 1.8 La traçabilité d'une chaîne d'approvisionnement

En matière d'identification et de traçabilité, l'ISO 9001 stipule les exigences suivantes : il est essentiel de choisir des moyens d'identification adaptés tout au long de la chaîne de production et de distribution pour garantir une identification précise des produits finis et des informations associées.

Alwaysheh et Klassen définissent la transparence comme la mesure dans laquelle les informations sont facilement accessibles aux deux parties impliquées dans un échange, ainsi qu'aux observateurs extérieurs. Dans le contexte de la chaîne d'approvisionnement, la transparence concerne les informations disponibles pour les entreprises impliquées dans un réseau d'approvisionnement.[3]

Dans la démarche logistique, la traçabilité est essentielle à trois niveaux distincts :

- **Au niveau de chaque tâche (ou opération) :** Cela implique de suivre et d'enregistrer toutes les activités et les étapes individuelles au sein de chaque processus logistique, depuis la réception des matières premières jusqu'à la livraison des produits finis. Cela permet de garantir que chaque étape est effectuée efficacement et conformément aux normes établies.
- **Au niveau de chaque entreprise :** Chaque entreprise participant à la chaîne d'approvisionnement doit également assurer la traçabilité de ses propres opérations.
- **Au niveau global de la supply chain :** La traçabilité à l'échelle de la chaîne d'approvisionnement implique de suivre et de documenter les mouvements de marchandises à travers toutes les étapes, y compris les fournisseurs, les fabricants, les transporteurs et les distributeurs. Les défis majeurs à ce niveau résident dans la coordination et la communication entre les différentes parties, en raison de la diversité des langages, des cultures, des technologies et des pratiques commerciales.[6]

La traçabilité, qu'elle soit ascendante, descendante, amont, aval, interne ou complète, fournit un historique complet des déplacements physiques des produits, permettant aux acteurs impliqués de suivre leur parcours au sein du système logistique de manière précise et transparente.

**La traçabilité descendante** est la capacité à retrouver la localisation de produits à partir de plusieurs critères donnés et cela peu importe le lieu de la chaîne d'approvisionnement scrutée. C'est cette traçabilité que l'on mobilise lorsque certains membres d'une chaîne d'approvisionnement souhaitent rappeler ou retirer des systèmes logistiques des

produits jugés dangereux pour la santé des consommateurs.

Mais lorsque les acteurs de la chaîne d'approvisionnement mènent par exemple des investigations pour déterminer la cause de la mauvaise qualité d'un article, c'est **la traçabilité ascendante** qu'ils mettent à contribution. En effet, cette dernière est la capacité à retrouver, peu importe le lieu du réseau logistique, l'origine et les caractéristiques d'un produit à partir d'un ou plusieurs critères donnés.[15]

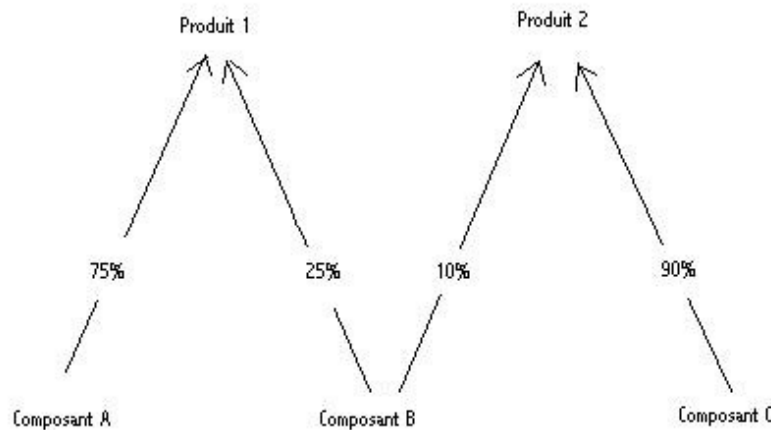


FIGURE 1.2 – La traçabilité descendante et la traçabilité ascendante.

Dans cet exemple, la traçabilité descendante et la traçabilité ascendante sont utilisées pour suivre le cheminement des produits et des composants en cas d'alerte ou d'anomalie.

Pour la traçabilité descendante, si une alerte est émise sur le Composant A, on remonte jusqu'au Produit 1 qui contient ce composant. Cela permet d'identifier les produits susceptibles d'être affectés par l'anomalie du Composant A, facilitant ainsi leur retrait ou leur correction. Quant à la traçabilité ascendante, si une alerte est signalée sur le Produit 2, on remonte jusqu'aux Composant B et C qui entrent dans sa composition. Cela permet d'identifier les sources potentielles de l'anomalie et de prendre des mesures correctives. Dans ce cas, si le Composant B est suspecté, il est également nécessaire de descendre jusqu'au Produit 1, car il pourrait également être affecté, étant donné qu'il contient également du Composant B.[17]

Les **traçabilités en amont** et **en aval** sont des formes de traçabilité qui se déterminent par rapport à une entité de référence. Cette entité peut être une entreprise, un atelier, une plate-forme logistique, un centre de distribution, etc.

La traçabilité **en amont** est la capacité à tracer l'origine des flux physiques de marchandises entrants.

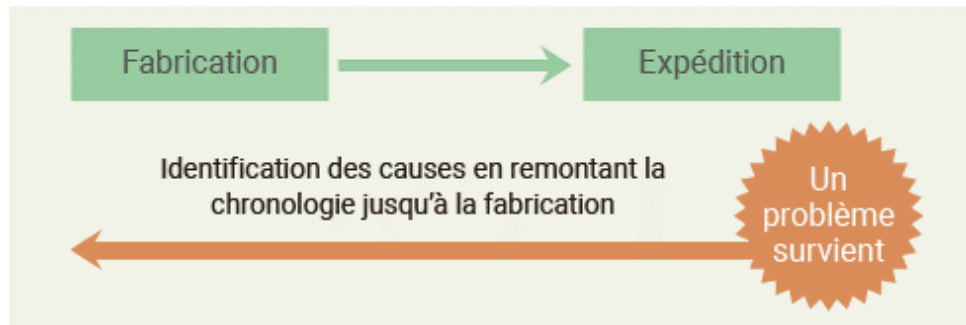


FIGURE 1.3 – Traçabilité en amont.

La traçabilité **en aval** est la capacité à tracer la localisation des flux physiques de marchandises sortants.

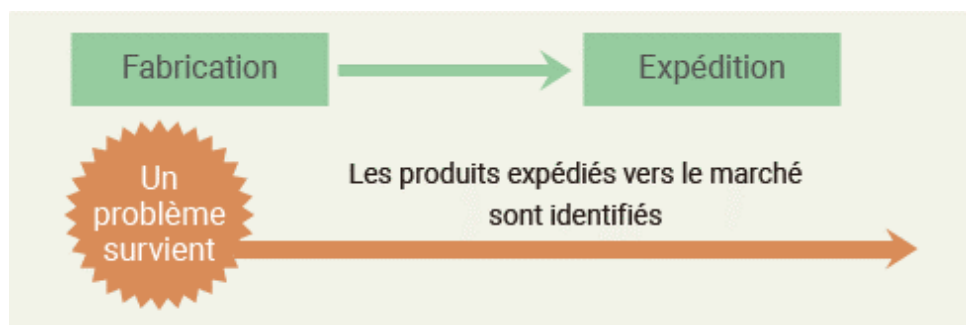


FIGURE 1.4 – Traçabilité en aval.

**La traçabilité interne** désigne la capacité de suivre tous les déplacements physiques des biens à l'intérieur de l'entreprise.

Lorsque la traçabilité est à la fois amont, interne et aval, autrement dit qu'elle est capable de couvrir l'ensemble d'une chaîne d'approvisionnement, elle est qualifiée de totale ou globale.[15]

Grâce à la traçabilité, les entreprises impliquées dans une chaîne d'approvisionnement peuvent non seulement retracer l'origine des flux logistiques d'une activité liée à la chaîne d'approvisionnement, mais aussi suivre l'évolution de ces flux physiques et d'information tout au long de leur existence au sein de l'écosystème logistique. Les flux naissent, vivent et meurent au sein de la chaîne d'approvisionnement ; la traçabilité met donc en lumière soit la vie passée soit la vie présente des flux logistiques.

## 1.9 Les trois aspects de la traçabilité

Les aspects de la traçabilité définissent la manière dont la traçabilité est mise en œuvre pour atteindre un objectif spécifique. Il est donc possible de suivre les flux logistiques de trois façons (aspects) :

- **Retrouver l'historique** : Cet aspect concerne la traçabilité en amont. Il englobe la capacité à retracer la composition d'un produit (notamment les noms des fournisseurs, de principes actifs, les quantités délivrées...) ainsi que toute information

pertinente liée aux étapes précédentes.[8]

- **Retrouver l'utilisation** : Cet aspect se rapporte à la traçabilité en aval, une démarche symétrique de l'historique. Elle désigne les procédures et outils mis en place pour pouvoir retrouver ce qui est advenu après le transfert physique, ou encore le transfert de propriété des produits de l'acteur vers un tiers. Cette démarche en aval est caractérisée par la capacité à tracer la localisation des produits sortants.[8]
- **Retrouver la localisation** : Il s'agit de pouvoir retracer physiquement un produit. Un bon suivi de traçabilité associe les flux d'informations aux différentes étapes d'un flux physique. Ainsi, la traçabilité correspond à la capacité de suivre des produits qualitativement et quantitativement dans l'espace et dans le temps.[8]

## 1.10 La chaîne d'approvisionnement pharmaceutique

La chaîne d'approvisionnement pharmaceutique couvre l'ensemble du processus, de l'acquisition des matières premières à la distribution aux patients. Le processus débute par l'achat des matières premières, suivi par la fabrication des ingrédients actifs et du médicament final. Ensuite, les médicaments sont distribués des fournisseurs vers les laboratoires, puis vers les grossistes, et enfin aux pharmacies, avant d'atteindre les patients.

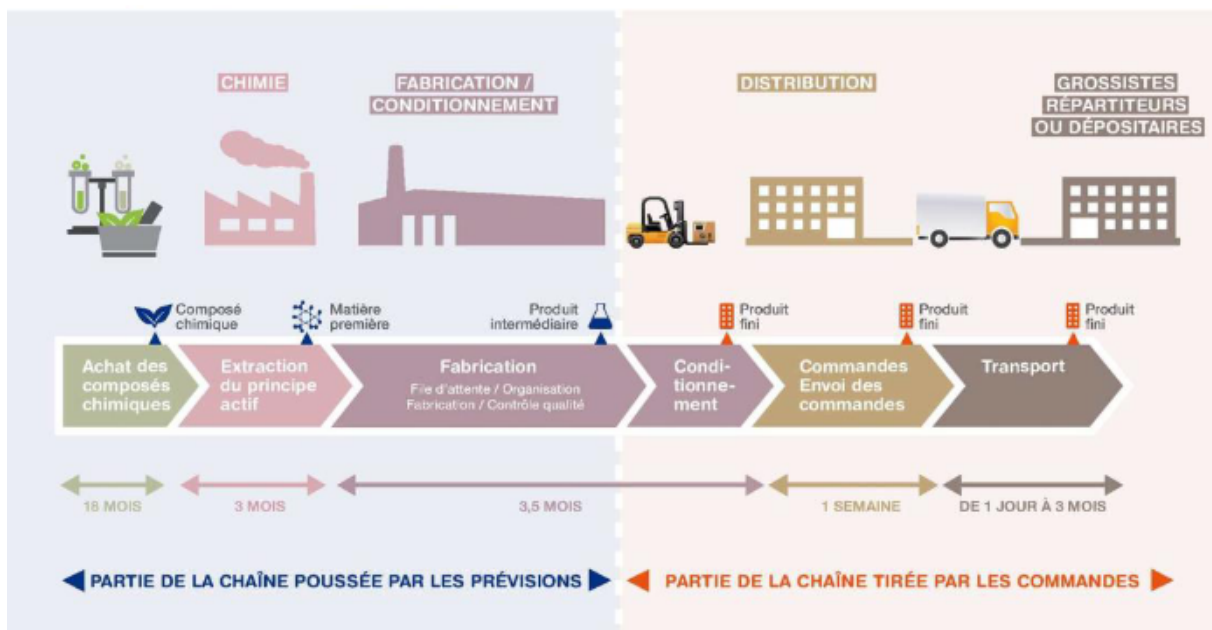


FIGURE 1.5 – Représentation d'une chaîne d'approvisionnement pharmaceutique.

Deux flux logistiques sont utilisés : un flux poussé, basé sur des prévisions, et un flux tiré par les commandes des pharmacies.

La dualité des flux logistiques peut être responsable des ruptures de stock occasionnelles dans le système. Par exemple, si les prévisions du flux poussé ne correspondent pas à la demande réelle des patients, cela peut entraîner des surplus ou des pénuries de

médicaments. De même, si le flux tiré n'est pas efficacement géré et que les commandes ne sont pas traitées rapidement, cela peut également entraîner des retards dans la disponibilité des médicaments pour les patients. Cela met en évidence l'importance cruciale d'une gestion efficace de la chaîne d'approvisionnement pharmaceutique, ainsi que de systèmes de suivi et de réapprovisionnement rapides pour atténuer l'impact de ces ruptures sur les patients.

L'OMS a établi quatre objectifs pour un système de gestion des approvisionnements pharmaceutiques efficace [11] :

- Sélectionner les médicaments offrant le meilleur rapport qualité-prix en quantités adéquates.
- Identifier des fournisseurs fiables proposant des produits de qualité supérieure.
- Garantir la ponctualité des livraisons.
- Minimiser les coûts totaux autant que possible.

### **1.11 Les parties prenantes de la chaîne d'approvisionnement pharmaceutique et leurs relations**

Le schéma suivant décrit le processus habituel de distribution des produits pharmaceutiques au sein de la chaîne d'approvisionnement.

Un fournisseur d'ingrédients pharmaceutiques actifs est chargé de livrer les matières premières nécessaires à la production des médicaments qui doivent être approuvés par des organismes réglementaires.

Le Laboratoire transforme ensuite ces matières premières en produits pharmaceutiques, les regroupant en lots .

Ensuite, le distributeur principal (grossiste primaire) reçoit plusieurs lots de produits et est responsable de les transférer soit directement aux pharmacies selon la demande soit à des distributeurs (grossistes) secondaires en cas de volumes importants. Ces distributeurs secondaires peuvent alors acheminer les lots vers les pharmacies.

Enfin, les pharmacies délivrent les produits pharmaceutiques aux patients généralement sur présentation d'une prescription médicale.

Tout au long de ce processus le transport des produits pharmaceutiques est souvent assuré par des prestataires de services logistiques et parfois les distributeurs utilisent leur propre flotte de véhicules pour le transport des produits.

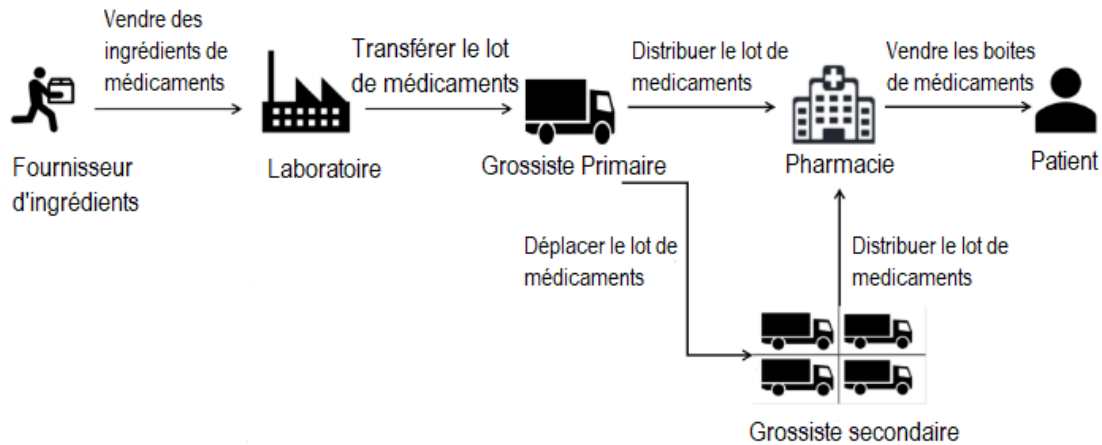


FIGURE 1.6 – Les parties prenantes de la chaîne d’approvisionnement pharmaceutique et leurs relations.

## 1.12 Les éléments à tracer

La traçabilité vise à suivre tous les éléments de la chaîne d’approvisionnement pharmaceutique, dont les plus importants sont :

- **Le lot** : Pour instaurer la traçabilité d’un lot suite à une défaillance interne ou en réponse à une requête externe, telle qu’une suspicion de contrefaçon, plusieurs éléments essentiels sont requis. Ces éléments comprennent : la date de fabrication, le certificat d’analyse, le certificat de conformité, le statut de validation du procédé (fabrication, conditionnement), la date de libération, le client concerné, ainsi que les quantités expédiées. Ces informations cruciales permettent de reconstituer le parcours du lot, facilitant ainsi la détection des anomalies, la prise de décisions rapides et la communication transparente avec les parties prenantes concernées.[8]
- **Les composants, matières premières et articles de conditionnement** : Il est crucial de garantir la qualité des éléments utilisés dans la fabrication du produit final. À cet égard, la traçabilité des éléments suivants est essentielle : Le nom du composant, le nom du fournisseur, la date de livraison et les quantités délivrées, le numéro de lot, ainsi que le certificat d’analyse ou de conformité. Cette démarche de traçabilité permet de suivre de manière précise l’origine, la quantité, et la qualité de chaque composant, assurant ainsi la conformité des matières premières et contribuant à maintenir les normes de qualité du produit final, elle joue également un rôle crucial dans la gestion efficace de la chaîne d’approvisionnement et dans la réaction rapide en cas de problèmes liés à la qualité des éléments utilisés.[8]
- **Le personnel** : Il est aussi essentiel de définir de manière explicite les rôles et les responsabilités de chaque intervenant à chaque étape de la production du produit. Cela implique la documentation des informations suivantes : le nom de l’opérateur, sa

qualification, sa formation, ainsi que les dates de ses interventions. Cette démarche vise à établir une traçabilité complète des acteurs impliqués dans le processus de production, permettant ainsi de garantir la transparence, la responsabilité et la conformité aux normes de qualité.[8]

- **Les locaux et les équipements** : Selon les Bonnes Pratiques de Fabrication, les locaux et les équipements doivent être conçus, construits, et entretenus de manière à minimiser les risques d'erreurs et de contaminations, et à garantir la qualité des produits. Cette approche assure une traçabilité complète des conditions environnementales, des interventions correctives et des activités liées à la production, ainsi que des éléments liés aux équipements tels que leur liste, leur qualification, leur entretien et les actions correctrices prises en cas d'anomalies. Ceci contribue à garantir la qualité et la conformité des procédés de fabrication.[8]

### 1.13 Les objectifs de la traçabilité

On peut identifier et définir cinq objectifs liés à la traçabilité : [8]

- **Objectif logistique** : La traçabilité optimise les flux logistiques en associant efficacement les informations aux déplacements des matières, facilitant ainsi l'accès instantané aux données spécifiques des lots. Elle améliore la gestion des stocks et des conditions de stockage en assurant une identification précise des matières premières à chaque étape. De plus, elle renforce la maîtrise du processus d'acheminement des produits, contribuant ainsi à une gestion globale efficace de la chaîne d'approvisionnement.
- **Objectif de sécurité** : L'objectif de sécurité dans le domaine pharmaceutique vise à assurer la sécurité des patients et des entreprises. En cas de défaillance de fabrication mettant en danger la sécurité des patients, le fabricant doit informer les autorités compétentes et procéder à un rappel de lots. Si les risques associés à un médicament dépassent ses bénéfices prévus, un retrait du marché est envisagé en concertation avec les autorités de santé et les industriels du médicament.
- **Objectif juridique** : La traçabilité permet d'identifier rapidement et en toute sécurité un produit ou un lot de produits en cas de danger ou de non-conformité. Chaque entité dans le processus de traçabilité est munie d'un identifiant distinct, comme un numéro de lot, pour la différencier et accéder à ses informations associées. Ces données, enregistrées dans le dossier de lot, fournissent une preuve concrète du parcours du médicament dans le site de fabrication. En cas de litige sur la contrefaçon, la traçabilité, associée au cahier des charges, est cruciale pour déterminer les responsabilités des parties impliquées.
- **Objectif économique** : La mise en place d'un système de traçabilité induit des coûts, mais son efficacité réside dans la réduction des dépenses liées aux rappels de produits grâce à une meilleure gestion logistique. Malgré ces coûts initiaux, la transparence offerte renforce l'image de marque de l'entreprise et établit la confiance des consommateurs, en faisant un investissement rentable à long terme.
- **Objectif de maîtrise et amélioration des processus** : La traçabilité phar-

maceutique simplifie le suivi des processus en identifiant les interruptions et les problèmes de ressources, favorisant ainsi l'amélioration continue et l'optimisation de la production. En étiquetant les produits, elle garantit l'intégrité des spécialités pharmaceutiques et permet une analyse approfondie des anomalies, déviations et variations des procédés. En identifiant les produits de non-qualité, elle facilite le contrôle des variations et la mise en place d'actions correctives, renforçant ainsi la qualité et la conformité des produits pharmaceutiques.

## 1.14 Conclusion

En conclusion, ce chapitre a mis en lumière l'importance cruciale de la traçabilité dans l'industrie pharmaceutique pour garantir la qualité, la sécurité et l'efficacité des médicaments. Nous avons défini les concepts de chaîne d'approvisionnement et de logistique, en soulignant leurs différences. Ensuite, nous avons exploré la traçabilité de la chaîne d'approvisionnement, en examinant ses différents types et aspects. Nous avons également analysé la chaîne d'approvisionnement pharmaceutique et identifié ses principales parties prenantes. Enfin, nous avons discuté des objectifs de la traçabilité, démontrant comment elle permet de contrôler la qualité des produits, de prévenir la contrefaçon, de répondre rapidement aux problèmes de sécurité et de conformité, et de garantir ainsi la santé et le bien-être des patients.



# Chapitre 2

## Généralité sur la technologie Blockchain

### 2.1 Introduction

La technologie Blockchain est devenue l'une des innovations les plus révolutionnaires de l'ère numérique actuelle. Son caractère disruptif découle de sa capacité à introduire des mécanismes décentralisés, sécurisés et transparents dans un large éventail de secteurs, allant de la finance à la logistique. Ce chapitre se concentre sur les fondamentaux de la technologie Blockchain, en mettant en évidence ses caractéristiques principales telles que la décentralisation, la sécurité et l'immuabilité des informations.

Pour saisir pleinement son impact et son potentiel, nous explorons en détail les différents types de Blockchains : les réseaux publics, les réseaux privés et les réseaux semi-privés, en soulignant leurs avantages, leurs inconvénients et leurs applications spécifiques. Le chapitre examine également les types de systèmes : centralisés, décentralisés et distribués et leurs implications pour la technologie Blockchain.

De plus, nous mettons en lumière l'utilisation de la Blockchain dans des domaines clés comme la chaîne d'approvisionnement et l'industrie pharmaceutique, en soulignant ses avantages pour la traçabilité des produits et la lutte contre la contrefaçon. Enfin, le chapitre se penche sur les avancées récentes et les projets notables réalisés avec la technologie Blockchain, démontrant son potentiel et ses applications pratiques à travers divers secteurs.

### 2.2 Définition de la Blockchain

La Blockchain est une technologie qui a vu le jour en 2008 grâce à **Satoshi Nakamoto**, pseudonyme utilisé par la ou les personnes ayant créé cette technologie. La Blockchain est née de l'invention du Bitcoin, une monnaie numérique qui n'est pas gérée par l'État ni les banques. Le Bitcoin est transférable électroniquement et rapidement. Bien que la Blockchain ait été initialement créée pour stocker l'historique des transactions en lien avec le Bitcoin, avec le temps, elle a été implémentée dans plusieurs secteurs.[18]

Une Blockchain est une base de données distribuée et partagée, acceptée par un réseau peer-to-peer. Elle est constituée d'une chaîne de blocs liés (unités de stockage de transactions), contenant des transactions horodatées sécurisées par la cryptographie à clé publique (hachage) et vérifiées par la communauté du réseau. Une fois qu'un élément est ajouté à la Blockchain, il ne peut plus être modifié, ce qui en fait un registre immuable

des activités passées.[7]

### 2.2.1 Le problème résolu par la Blockchain

Le problème que **Nakamoto** a résolu avec la Blockchain est celui de l'établissement de la confiance dans un système distribué. Plus précisément il s'agissait de créer un stockage distribué de documents horodatés dans lequel aucune partie ne pouvait modifier le contenu des données ou les horodatages sans être détectée.[5]

À l'origine, l'objectif était de créer un moyen de paiement électronique basé sur des jetons, en utilisant un réseau décentralisé. Cette initiative visait à établir une forme de monnaie spécifiquement adaptée à Internet ,incarnée par le bitcoin et soutenue par la technologie fondamentale de la Blockchain, conçue pour fonctionner en parallèle avec les protocoles d'Internet.

La Blockchain est une entité autonome avec ses propres règles distincte de ces protocoles spécialisée dans la gestion décentralisée des transactions financières numériques.

La naissance du bitcoin semble également liée à la crise financière de 2008 où les questions de confiance envers les institutions bancaires et les monnaies traditionnelles étaient au premier plan.

Elle rend ainsi superflu le recours à un tiers de confiance habituellement nécessaire dans les transactions numériques impliquant des transferts de titres ou de valeurs.

Selon le professeur et le chercheur en informatique **Jean-Paul Delahaye** il faut en effet s'imaginer « un très grand cahier que tout le monde peut lire librement et gratuitement sur lequel tout le monde peut écrire mais qui est impossible à effacer et indestructible ».[22]

## 2.3 L'historique de la technologie Blockchain

En 1988, **David Chaum** propose un nouveau système de paiement anonyme pour permettre aux utilisateurs d'effectuer des transferts d'argent sur internet sans être traçables par le gouvernement. Cependant, le projet est un échec en partie parce que le commerce électronique en est encore à ses débuts et le projet est abandonné faute de ressources suffisantes.

En 1991, **Haber et Stornetta** ont proposé une chaîne cryptographique sécurisée de blocs. Ici un client envoie un document au serveur de temps (un serveur de temps est une entité informatique qui fournit des horodatages précis à des événements, des transactions ou des données. Son objectif principal est de certifier et de marquer l'instant précis auquel un événement spécifique s'est produit) pour obtenir un horodatage et le serveur signe le document avec le serveur actuel. Une donnée spécifique est mentionnée par un pointeur mais pas avec l'adresse du document. Ainsi, lorsqu'une donnée est modifiée le pointeur devient invalide et personne n'est en mesure de pirater les données dans le serveur.

En 1997, **Adam Back** a proposé une méthode de preuve de travail sous le nom de hashcash. Le principe est d'effectuer une certaine quantité de travail nécessitant des ressources CPU pour accéder à un service. Dans le cas d'un utilisateur autorisé ce travail est négligeable, alors que dans le cas d'une personne malveillante voulant accéder au service de manière répétée, cette quantité de travail devient considérable. Cette technique est utilisée par exemple pour lutter contre le spam ou le déni de service. Mais hashcash

permet aussi de surmonter le problème du consensus.

En 1998, **Wei Dai** utilise cette preuve de travail pour synchroniser sur un réseau une base de données décentralisée, appelée bmoney dans laquelle la valeur de chaque participant est enregistrée. La même année, **Nick Szabo** a proposé le BitGold avec un principe similaire

En 2008, **Satoshi Nakamoto** a écrit l'article fondateur du Bitcoin la première véritable blockchain. Ce nom semble être un pseudonyme et l'identité réelle de cette personne ou de ce groupe de personnes reste un mystère à ce jour. La première implémentation de Bitcoin a eu lieu l'année suivante en 2009 sous le nom de Bitcoin-Qt. C'est également la première fois que le mot blockchain est utilisé..

En 2013, **Vitalik Buterin** décide de reprendre le concept de la blockchain en y ajoutant la possibilité d'exécuter des applications décentralisées. L'objectif de cette nouvelle blockchain appelée Ethereum est de construire une sorte d'ordinateur géant décentralisé. Ces applications sont possibles grâce aux contrats intelligents (smart contracts). Ce concept a été publié pour la première fois en 1994 par **Nick Szabo** qui présentait le smart contract comme "un protocole de transaction informatisé qui exécute automatiquement les termes d'un contrat". Un accord entre plusieurs entités écrit sous la forme d'un code informatique, et décentralisé.

La première génération de Blockchain est connue sous le nom de Blockchain 1.0, La Blockchain 2.0 peut être considérée comme une nouvelle application de la Blockchain et elle est apparue pour la première fois en 2014. La taille du fichier de la Blockchain du Bitcoin atteignant 20 Go, qui contenait les informations de toutes les transactions.

En 2015, la taille atteignait presque 30 Go et en 2017, 100 Go. IBM a ouvert un centre de recherche sur la Blockchain à Singapour en juillet 2016. Aujourd'hui, à l'époque de la Blockchain 3.0 les chercheurs s'efforcent d'améliorer la qualité des données.[4]

Enfin, la figure suivante illustre la communauté cypherpunk, dont les mineurs étaient à l'origine de la création de Bitcoin et ont servi de source d'inspiration à Satoshi Nakamoto lors de la conception de la monnaie numérique, avec un seul objectif : protéger la vie privée sur Internet.

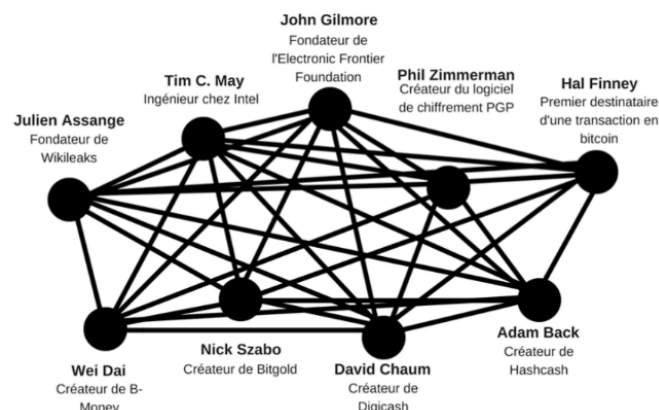


FIGURE 2.1 – Les principaux acteurs de la communauté cypherpunk.

## 2.4 Le fonctionnement de la Blockchain du Bitcoin

Tout système de Blockchain est simplement un grand livre distribué et décentralisé. Le grand livre est une chaîne de blocs, voyons ce que comprend un bloc.[1]

Chaque bloc d'une Blockchain comprend trois éléments essentiels :

### 1) Les données à l'intérieur du bloc :

Les données contenues dans chaque bloc changent en fonction de la technologie utilisée. Par exemple, dans une Blockchain bitcoin les blocs contiennent l'identifiant de l'expéditeur, l'identifiant du destinataire ainsi que le montant des bitcoins transférés.

Les blocs de la Blockchain bitcoin contiennent chacun 1 Mo de données. En 2020, il y avait environ 525000 blocs, qui veut dire que la taille totale de la Blockchain de bitcoins était d'environ 525000 Mo. Les données principales de la Blockchain du bitcoin sont les données de toutes les transactions en bitcoins.



FIGURE 2.2 – Représentation d'une chaîne de blocs.

Le bloc 46 décrit chronologiquement les premières transactions effectuées jusqu'à 1 Mo. Les transactions suivantes pesant 1 Mo sont stockées dans le bloc 47 et ainsi de suite. Ces blocs sont maintenant enchaînés les uns aux autres.

Pour les enchaîner chaque bloc reçoit une signature (hash) unique qui correspond exactement à la chaîne de données qu'il contient. En cas de modification à l'intérieur d'un bloc, celui-ci reçoit une nouvelle signature numérique.

Supposons que le bloc 46 enregistre quatre transactions : la transaction 92, 93, 94 et la transaction 95. Supposons que ces transactions représentent un total de 1 Mo, ce bloc de données reçoit maintenant une signature pour cette chaîne de données spécifique. Disons que la signature est "X32", une modification d'un seul chiffre des données du bloc 46 produira une nouvelle signature. Les données du bloc 46 sont maintenant liées au bloc 47 en ajoutant la signature du bloc 46 aux données du bloc 47. Dans ce cas, la signature du bloc 47 dépend de la signature du bloc 46.

Les signatures relient les blocs entre eux et contribuent à la réalisation d'une chaîne de blocs qui est un ensemble de transactions multiples, si les données du bloc 46 sont légèrement modifiées, le bloc 46 reçoit une nouvelle signature numérique et les blocs 46 et 47 ne peuvent donc pas être reliés l'un à l'autre.

Cela indique aux autres utilisateurs de la Blockchain que certaines données ont été modifiées dans le bloc 46. Ils rejettent cette modification non autorisée en revenant à un enregistrement antérieur de la Blockchain où tous les blocs sont encore enchaînés. La seule façon pour qu'une modification soit acceptée ou non détectée est que tous les blocs restent enchaînés ensemble, cela veut dire que pour une modification soit acceptée sans être détectée dans une Blockchain, il faudrait modifier non seulement le bloc en question, mais aussi tous les blocs suivants dans la chaîne. Cela est extrêmement difficile voire impossible à réaliser en pratique en raison du consensus décentralisé et de la puissance de calcul nécessaire pour effectuer de telles modifications de manière cohérente.

## 2) Le hachage d'un bloc :

Les données dans une Blockchain sont regroupées en blocs. Chaque bloc contient un ensemble de transactions validées, un nouveau bloc est ajouté à la chaîne à intervalles réguliers.

Le hachage d'un bloc est sa signature numérique et la technique du hachage joue un rôle essentiel dans le développement du concept de la Blockchain. Chaque bloc d'une blockchain contient un hachage unique et peut être comparé à une empreinte digitale.

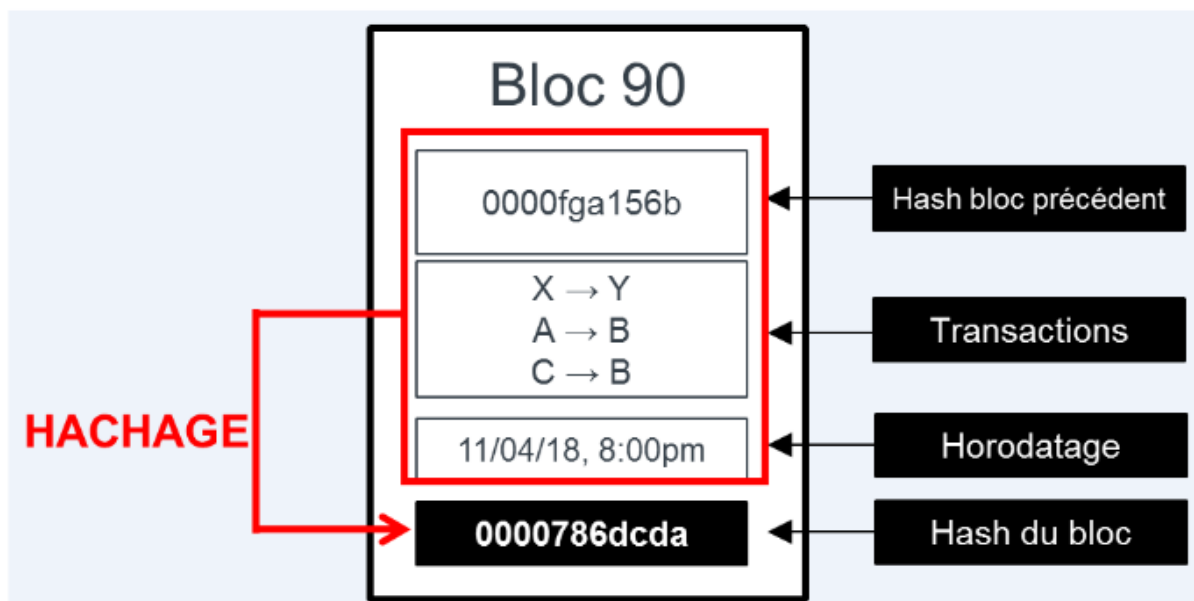


FIGURE 2.3 – La structure d'un bloc et le rôle du hash.

Si le hachage d'un bloc est modifié dans une Blockchain, les blocs consécutifs ne le reconnaissent plus comme un bloc valide. Ainsi, toute forme d'altération rend le bloc invalide. Il s'agit là d'un mécanisme de sécurité important fourni de manière native par la Blockchain.

## 3) Comment la signature (hachage) est créée :

Le bloc 90 est un enregistrement d'une transaction : A envoie 100 bitcoins à B. Cette chaîne de données spécifique nécessite maintenant une signature. Dans la Blockchain,

cette signature est créée par une fonction de hachage cryptographique qui est une formule très compliquée qui prend n'importe quelle chaîne d'entrée et la transforme en une chaîne de sortie unique de 64 chiffres, par exemple si nous insérons le mot "Bonjour" dans cette fonction de hachage, la sortie pour cette chaîne de données spécifique en hexadécimale est :

F7FF9E8B7BB2E09B70935A5D785E0CC5D9D0ABF0CA88A8B7F82B  
C8BABC4B79C8

Si un seul chiffre de l'entrée change en incluant un espace, en changeant une lettre majuscule ou en ajoutant un point par exemple la sortie sera totalement différente.

Une fonction de hachage cryptographique donne toujours le même résultat pour la même entrée mais toujours un résultat différent pour une entrée différente. Cette fonction de hachage cryptographique est utilisée par la Blockchain bitcoin pour donner aux blocs leur signature. Dans ce cas l'entrée de la fonction de hachage cryptographique est constituée par les données du bloc et la sortie est la signature qui s'y rapporte.

Il existe plusieurs algorithmes de hachage. Par exemple pour l'application bitcoin, l'algorithme de hachage SHA-256 est préféré pour générer une signature numérique pour chacun des blocs d'une blockchain.

- En résumé, un bloc contient désormais :
- 1- Les données de transaction.
  - 2- La signature du bloc précédent .
  - 3- Le nonce( number used once : un nombre aléatoire qui garantit que les anciens hachages du bloc ne peuvent pas être réutilisés).

Le processus de modification répétée du nonce pour trouver une signature éligible s'appelle le minage et c'est ce que font les mineurs.

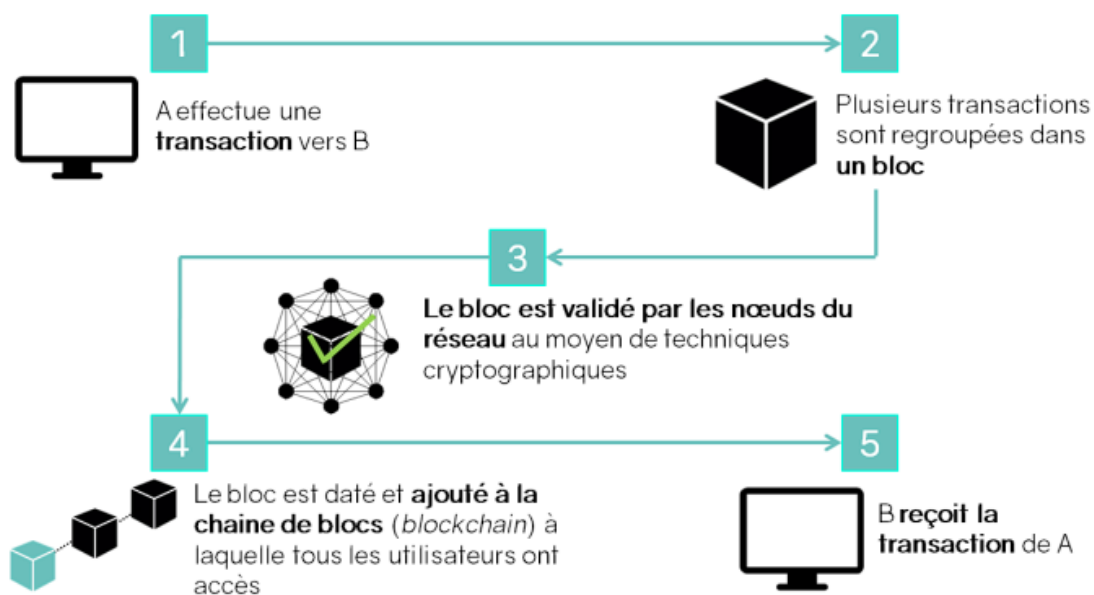


FIGURE 2.4 – Processus de création des blocs et exécution d'une transaction dans une Blockchain.

## 2.5 Concepts et définitions liées à la technologie Blockchain

- **Le réseau P2P** : Le réseau P2P décentralisé de la Blockchain, composé de nombreux nœuds égaux, offre l'évolutivité, la robustesse et une confidentialité élevées. Les utilisateurs peuvent rejoindre ou quitter le réseau sans perturbation majeure, et l'ajout de nœuds améliore sa capacité globale. Sa résistance aux attaques et sa tolérance aux pannes surpassent les systèmes centralisés, grâce à l'absence de serveur centralisé. La communication P2P réduit les risques de fuite ou de surveillance des données, tandis que les coûts réduits et la répartition efficace de la charge renforcent la performance du système blockchain.

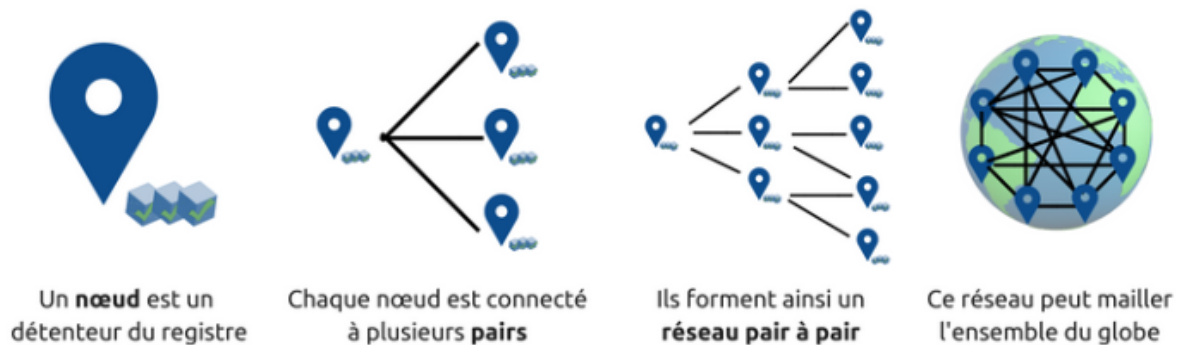


FIGURE 2.5 – La notion de réseau pair-à-pair.

- **La crypto-monnaie** : est une forme de monnaie numérique sécurisée par la cryptographie, indépendante des banques centrales. Elle utilise un système décentralisé pour réguler la création de nouvelles unités et vérifier les transactions enregistrées dans une Blockchain publique. Ce système permet une gestion transparente et sécurisée des fonds sans nécessiter d'autorité centrale pour superviser les échanges.
- **Un registre distribué** : c'est une base de données qui est partagée et synchronisée de manière consensuelle à travers le réseau décentralisé, il permet aux transactions d'avoir des "témoins" publics rendant ainsi une cyberattaque plus difficile.
- **Les contrats intelligents** : (smart contracts) sont des programmes informatiques auto-exécutables qui permettent de définir et d'appliquer des règles spécifiques pour les transactions sur une Blockchain. Ils sont conçus pour faciliter, vérifier et exécuter la négociation ou l'exécution d'un contrat. Ethereum est la plateforme la plus connue pour les contrats intelligents mais ils peuvent être exécutés sur d'autres Blockchains.
- **Les mineurs** : sont les entités informatiques (ordinateurs, serveur) qui assurent le fonctionnement de la Blockchain en fournissant une grande quantité de ressources informatiques en concurrence pour résoudre une énigme cryptographique (problème mathématique complexe), ils sont en concurrence les uns avec les autres pour générer un bloc de transactions valide, une fois l'énigme résolue, ils génèrent un bloc et sont également récompensés.



- **Le hachage** : est une technique cryptographique qui permet de faire correspondre des données d'entrée à des données de taille fixe en sortie. Bitcoin utilise l'algorithme SHA-256. SHA-256 produit un nombre de longueur fixe. Une légère modification de l'entrée modifierait la sortie complète, mais la sortie serait toujours de la même longueur.
- **L'algorithme de consensus** : est un processus informatique utilisé pour parvenir à un accord sur une valeur de données unique entre des systèmes distribués. Les algorithmes de consensus sont conçus pour assurer la fiabilité d'un réseau impliquant plusieurs nœuds. Ils sont capables de faire deux choses : garantir que le bloc suivant dans une blockchain est la seule et unique version de la vérité et empêcher des adversaires puissants de faire dérailler le système et de modifier avec succès la chaîne.
- **La notion de double dépense** : la notion de double dépense se réfère au risque potentiel dans les systèmes financiers numériques, en particulier dans les cryptomonnaies où une même unité de valeur pourrait être dépensée plus d'une fois de manière frauduleuse. Ce problème est particulièrement crucial dans les transactions électroniques décentralisées sans l'intervention d'une autorité centrale de confiance.

## 2.6 Les caractéristiques de la technologie Blockchain

La Blockchain est une technologie simple en concept mais complexe dans sa mise en œuvre. À cette fin, avant d'utiliser cette technologie il est essentiel dans un premier temps de pouvoir définir les caractéristiques d'une Blockchain.

Toute Blockchain complète comporte cinq caractéristiques principaux essentiels pour assurer la fiabilité de ses informations : la décentralisation, l'immuabilité, la transparence, la méthode de consensus et les contrats intelligents.[19]

- 1) **La décentralisation** : ou la distributivité, est l'idée fondamentale derrière une Blockchain. La Blockchain repose sur un réseau de nœuds en communication P2P permettant d'avoir un système totalement distribué. Le bitcoin, le premier réseau Blockchain, repose sur un réseau décentralisé et distribué. Ce réseau comme plusieurs autres réseaux Blockchain publics tels que l'Ethereum, n'a pas d'autorité qui pourrait centraliser le contrôle de l'information et atteindre à sa sécurité en réduisant la surface d'attaque. Cette distribution des ressources permet au réseau d'être résistant aux pannes. Si un nœud ou un groupe de nœuds tombent en panne les autres nœuds comportent assez d'information pour maintenir le fonctionnement adéquat du réseau. Dans un cas extrême un seul nœud serait suffisant pour préserver l'existence du réseau en attendant que les autres nœuds se remettent en marche. Cette distributivité est aussi utilisée comme argument pour l'autonomie de l'information et sa résistance à la censure(supprimer, restreindre ou interdire la diffusion d'information).
- 2) **L'immuabilité** : L'immuabilité se réfère à la caractéristique d'une fois qu'une information est enregistrée dans un bloc de la blockchain elle devient pratiquement impossible à modifier. La Blockchain emploie un mécanisme de hachage ainsi qu'un chaînage de données afin d'assurer leur immuabilité. Dans la blockchain, les informations sont enregistrées sous forme de transactions individuelles contrairement à une solution de



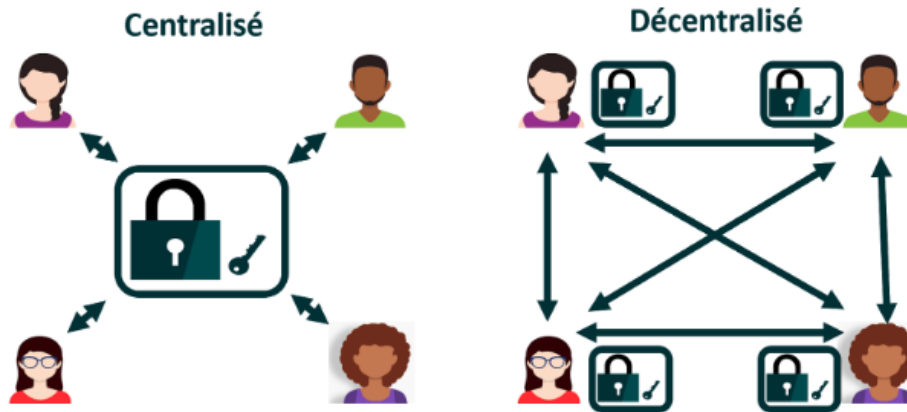


FIGURE 2.6 – Représentation du partage de données en adoptant une approche centralisée et décentralisée.

base de données traditionnelle ou seul l'état le plus récent est enregistrée. De cette manière, on peut, à tout moment recalculer l'état le plus récent d'un actif en retraçant la liste de toutes les transactions qui ont changé son état.

- 3) **La transparence** : C'est l'avantage le plus important. Une fois qu'un document est enregistré sur la Blockchain, cela certifie son existence à un moment précis et garantit qu'il n'a pas été altéré. La transparence de la Blockchain réside dans le fait que n'importe qui peut télécharger l'intégralité de la Blockchain et vérifier son intégrité à tout moment. Ainsi, tous les utilisateurs de la Blockchain ont accès aux transactions passées et présentes. Comme dans le réseau Bitcoin, toutes les transactions sont publiques et vérifiables par tous en effectuant un mécanisme consensus, ce consensus sur le séquençement des transactions permet de résoudre le problème de la "double dépense" comme on a cité auparavant.
- 4) **Le consensus** : Puisqu'il y a plusieurs nœuds qui participent de manière décentralisée, il est essentiel de déterminer un mécanisme permettant de s'assurer que tous les nœuds sont synchronisés. Sans système de consensus, il est impossible de différencier les blocs ou transactions valides de ceux qui sont invalides. Selon l'entrepreneur **Pierre Porthaux**, le bitcoin repose sur trois consensus interconnectés, chacun étant nécessaire au fonctionnement général de ce système : un consensus sur les règles, un consensus sur l'histoire et un consensus sur le fait que le bitcoin a de la valeur. Pour lui, le bitcoin n'a d'ailleurs de la valeur que parce qu'il existe un consensus sur le fait qu'il en a. [22]



FIGURE 2.7 – Les trois consensus du bitcoin.

- 5) **Les contrats intelligents** : Afin de pouvoir manipuler les données du registre, les blockchains peuvent posséder des structures appelées contrats intelligents. Sur la Blockchain Bitcoin, les données sont manipulées via le Bitcoin Script qui permet des opérations simples. Etant donné des limitations dans le Bitcoin Script, les instructions créées ne sont pas considérées comme étant des contrats intelligents. Cependant, elles ont formé les bases sur lesquelles les contrats intelligents modernes ont été créés.

Sur la Blockchain Ethereum, les contrats intelligents sont implémentés principalement dans le langage Solidity, un langage de programmation Turing-complète, permettant de manipuler directement des quantités d'Ethereum et des données propres au contrat. Ces contrats sont compilés avec un compilateur spécifique à ce nouveau langage. Avec Solidity, il est aussi possible d'interagir avec différents contrats afin de créer un écosystème complexe résidant sur la blockchain Ethereum.

Bien sûr, il est possible de créer une Blockchain sans contrats intelligents. Cependant, la création de contrats intelligents peut certainement être considérée comme un attribut principal ayant popularisé la blockchain.

## 2.7 Les mécanismes de validation de blocs (les consensus)

La validation des blocs dans la blockchain est le fondement de la sécurité et de la fiabilité de cette technologie. Comprendre les mécanismes qui permettent de valider et d'ajouter des blocs à la chaîne est essentiel pour saisir le fonctionnement de la blockchain.

### 2.7.1 Proof Of Work :

Dans le cas du Bitcoin, le mode de validation est une compétition cryptographique appelée « preuve de travail ». Celle-ci suppose en effet la réussite d'un utilisateur appelé « mineur » à une épreuve cryptographique dénommée « minage » qui se répète en moyenne toutes les dix minutes. Pour le Bitcoin les mineurs remportent les nouveaux bitcoins créés lors de chaque validation de bloc.

La réussite à l'épreuve consiste à obtenir un hachage du bloc que le mineur souhaite intégrer, et ce hachage doit commencer par un certain nombre de zéros. Il s'agit donc d'un calcul itératif et aléatoire, dont la résolution peut être plus ou moins longue et sa

difficulté peut être ajustée de telle sorte que le temps moyen de résolution soit proche d'une durée donnée.

**La rémunération des mineurs :** Le protocole de **Nakamoto** prévoit que la création de chaque bloc conduit à l'émission de nouveaux Bitcoins utilisés pour récompenser chaque mineur validant un bloc. Le montant de cette récompense est divisé par deux tous les 210 000 blocs, c'est-à-dire tous les quatre ans. Il était ainsi de 50 bitcoins jusqu'en 2012, puis de 25 jusqu'en 2016, il était de 12,5 en 2018 et de 6,25 en 2020. Cette réduction progressive du niveau d'émission de nouveaux bitcoins est appelée « halving ». Elle a pour objectif de maintenir une certaine rareté de cette monnaie.[22]

Selon le professeur **Jean-Paul Delahaye**, « le problème de la consommation électrique des cryptomonnaies est celui de la preuve de travail », c'est pourquoi des alternatives sont développées et ont vocation à la remplacer. Cependant, leur sécurité est souvent moins certaine et elles présentent un risque de centralisation. La principale alternative est appelée preuve d'enjeu ou proof of stake (POS).[22]

### 2.7.2 Proof Of Stake :

La preuve d'enjeu, preuve de participation ou preuve d'intérêt, est un mécanisme de consensus appliqué dans les chaînes de blocs publiques qui compte parmi les plus populaires. Bien que l'objectif soit le même, le fonctionnement est différent. Dans le cas de la preuve d'enjeu, le choix du nœud (Serveurs) qui effectuera le processus de validation d'un bloc se fait de manière aléatoire, mais aussi en se basant sur le nombre de jetons possédés par le nœud.

### 2.7.3 Proof Of Authority :

La preuve d'autorité est une méthode de consensus où seuls les participants approuvés ont l'autorisation de valider des transactions. Les participants préalablement autorisés sont généralement des entités de confiance spécifiques qui ont été sélectionnées à l'avance pour jouer le rôle de validateurs dans le réseau blockchain. La sélection des participants autorisés dépend du contexte spécifique de la blockchain. Par exemple, dans un réseau blockchain privé d'entreprise, les participants autorisés pourraient être des membres clés de l'organisation.

Contrairement au consensus de la preuve de travail, tel que les avantages principaux de ce mécanisme sont sa faible consommation d'énergie et la rapidité dans la validation des transactions. La preuve d'autorité est très souvent utilisée dans le cas des Blockchains privées et les Blockchains semi-privées.

## 2.8 Différents modèles de Blockchain

La Blockchain peut être classée en trois catégories principales : publique, privée et semi-privée. Ces distinctions se fondent sur le niveau d'accès et de participation autorisé dans le réseau.

### 2.8.1 Blockchain publique :

Ce type de Blockchain compte avec un grand réseau distribué et accessible à tout le monde, ceci étant possible grâce à son code open source. Deux exemples les plus populaires sont le Bitcoin et l'Ethereum, où les transactions faites sur ces registres sont visibles par

tout le monde et bien que chacun ait ses spécificités, mais les principes sont les mêmes, ce qui veut dire que les informations sont décentralisées, sécurisées et immuables.

### **2.8.2 Blockchain privée :**

Elle est considérée par beaucoup de personnes comme partiellement éloignée du concept de la Blockchain, il s'agit d'une chaîne de blocs accessible à un nombre limité d'utilisateurs. Le code source n'étant pas ouvert, l'information ne doit pas être publique. Il s'agit d'une gouvernance centralisée qui gère, contrôle et valide les participants. Ce type de chaîne de blocs est dans la plupart des cas utilisée par les consortiums qui échangent des informations confidentielles.

### **2.8.3 Blockchain semi-privée :**

Une Blockchain semi-privée, caractérisée par un code open source, combine des aspects des Blockchains publiques et privées. Elle assure une rapidité d'utilisation sans nécessiter de preuve de travail, préservant ainsi la scalabilité et la confidentialité des transactions. Principalement utilisée dans des secteurs comme la finance.

## **2.9 Les types de systèmes**

Une blockchain idéale serait à la fois décentralisée, distribuée et capable de traiter un grand nombre de transactions par seconde, tout en garantissant une sécurité sans faille. Cela nous oblige à définir les notions de systèmes centralisés, décentralisés et distribués [2].

### **2.9.1 Système centralisé :**

Dans le cas d'une architecture centralisée, il existe un système de coordination central dans lequel chaque nœud est connecté à ce système et tout ce qu'ils veulent partager comme information sera partagé par ce système. Dans ce système, un problème se pose si le système de coordination central tombe en panne (point de défaillance unique), tous ces nœuds individuels seront déconnectés et le réseau s'arrêtera.

### **2.9.2 Système décentralisé :**

Dans le cas du système décentralisé, il y a un certain nombre de coordinateurs au lieu d'un seul et tous les coordinateurs et leurs nœuds individuels coopèrent les uns avec les autres. Si un ou plusieurs nœuds tombent en panne, ils peuvent se connecter aux autres coordinateurs ou aux autres nœuds individuels. Ils peuvent partager leurs informations ou effectuer les tâches en utilisant les coordinateurs disponibles. Dans cette architecture, si une défaillance simultanée des nœuds se produit, les nœuds individuels peuvent ne pas être en mesure de coopérer les uns avec les autres et le réseau est déconnecté. Ainsi, pour résoudre le problème d'un système décentralisé, l'architecture distribuée entre en scène.

### 2.9.3 Système distribué :

Dans une architecture distribuée, il n'est pas nécessaire d'avoir une autorité centrale. Dans cette architecture, chaque nœud est connecté et coordonné avec tous les autres nœuds. Ils peuvent partager collectivement les informations et travailler ensemble. Ainsi, si un ou plusieurs nœuds tombent en panne, les autres nœuds peuvent partager leurs informations ou effectuer l'opération en utilisant la coordination et la coopération.



FIGURE 2.8 – Représentation des systèmes centralisés, décentralisés et distribués.

## 2.10 La Blockchain dans la chaîne d'approvisionnement

La blockchain présente de nombreux avantages dans la chaîne d'approvisionnement. En effet, cette technologie peut être appliquée dans plusieurs activités de la chaîne d'approvisionnement, les applications qui présenteraient un intérêt majeur seraient la traçabilité d'un produit depuis sa fabrication, l'échange de documents en toute sécurité et la lutte contre la contrefaçon.[18]

Dans la chaîne d'approvisionnement, la traçabilité permet l'enregistrement et le suivi des produits depuis leur origine chez le fournisseur jusqu'à leur transformation éventuelle et leur distribution en tant que produit fini. Ce processus est essentiel pour garantir la transparence et la qualité des produits pour les consommateurs, répondant ainsi à une demande croissante de clarté sur leur provenance et leur fabrication.

Pour les entreprises, la traçabilité revêt une importance capitale. Elle leur offre la possibilité de maintenir un contrôle de qualité rigoureux tout au long du processus, de gérer efficacement les flux de produits dans la chaîne d'approvisionnement, et de détecter rapidement et de corriger les éventuelles défaillances. En outre, la traçabilité représente un avantage concurrentiel, car elle renforce la confiance des consommateurs et positionne l'entreprise comme un acteur responsable et transparent sur le marché.[18]

L'application de la Blockchain dans la traçabilité offre un moyen sécurisé et immuable d'enregistrer et de suivre toutes les étapes du cycle de production jusqu'à la vente. Cette technologie garantit que les informations ne peuvent être ni supprimées ni modifiées par les individus ou les entités impliquées dans l'industrie. En outre, elle accroît la transparence envers les clients, qui peuvent ainsi suivre le parcours complet des produits et accor-

der leur confiance aux fournisseurs. Les entreprises peuvent ainsi mieux lutter contre la contrefaçon des produits, qu'il s'agisse de médicaments, d'aliments, de bijoux ou d'autres biens.[18]

## 2.11 Implémentation de la Blockchain dans l'industrie pharmaceutique

En ce qui concerne la chaîne d'approvisionnement pharmaceutique, un des défis à relever est la contrefaçon des médicaments.

D'après une recherche menée par l'Organisation Mondiale de la Santé en 2017, « un médicament sur dix en circulation dans les pays à revenu faible ou intermédiaire est selon les estimations soit de qualité inférieure soit falsifié ». Dans ce secteur la Blockchain est utilisée particulièrement dans les essais cliniques, cette étude de recherche médicale est une partie fondamentale dans l'industrie pharmaceutique. Un essai clinique a pour but le développement de nouveaux traitements (médicaments, vaccins, etc.). Il faut savoir que les essais cliniques sont composés de plusieurs phases et de plusieurs acteurs durant chaque phase.

Par conséquent, le réseau logistique est indispensable au succès de ces recherches médicales. L'avantage principal de l'implémentation de la Blockchain dans les essais cliniques est la sécurité que celle-ci apporte quant au transfert des données (patients, médecins, laboratoires. . .).[18]

Une autre technologie combinée à la Blockchain est celle de l'internet des objets (IOT), cette dernière est utilisée dans le but de récolter les données des patients, par exemple l'utilisation de montres intelligentes, pour contrôler le rythme cardiaque des patients.

En outre, la traçabilité et immuabilité de la Blockchain permettrait à l'industrie pharmaceutique de garder une empreinte numérique de chaque action menée sur les médicaments, depuis leur fabrication jusqu'à leur distribution. En effet, toutes les informations récoltées pendant les différentes phases peuvent être vérifiées par les acteurs de la chaîne d'approvisionnement pharmaceutique, ce qui leur permettra de constater l'authenticité des produits. De plus, le suivi des étapes de la chaîne de distribution des médicaments peut être effectué en combinant la Blockchain avec les technologies comme les puces RFID ou les code-barres DataMatrix.

En effet, grâce à ces technologies il est possible de transmettre les données du suivi des médicaments à la Blockchain, ceci afin d'assurer la traçabilité du produit. Par conséquent, les transactions effectuées sur les blocs sont inchangeables et horodatées, ce qui garantit que les données de traçabilité sur les médicaments ne soient pas altérées.[18]

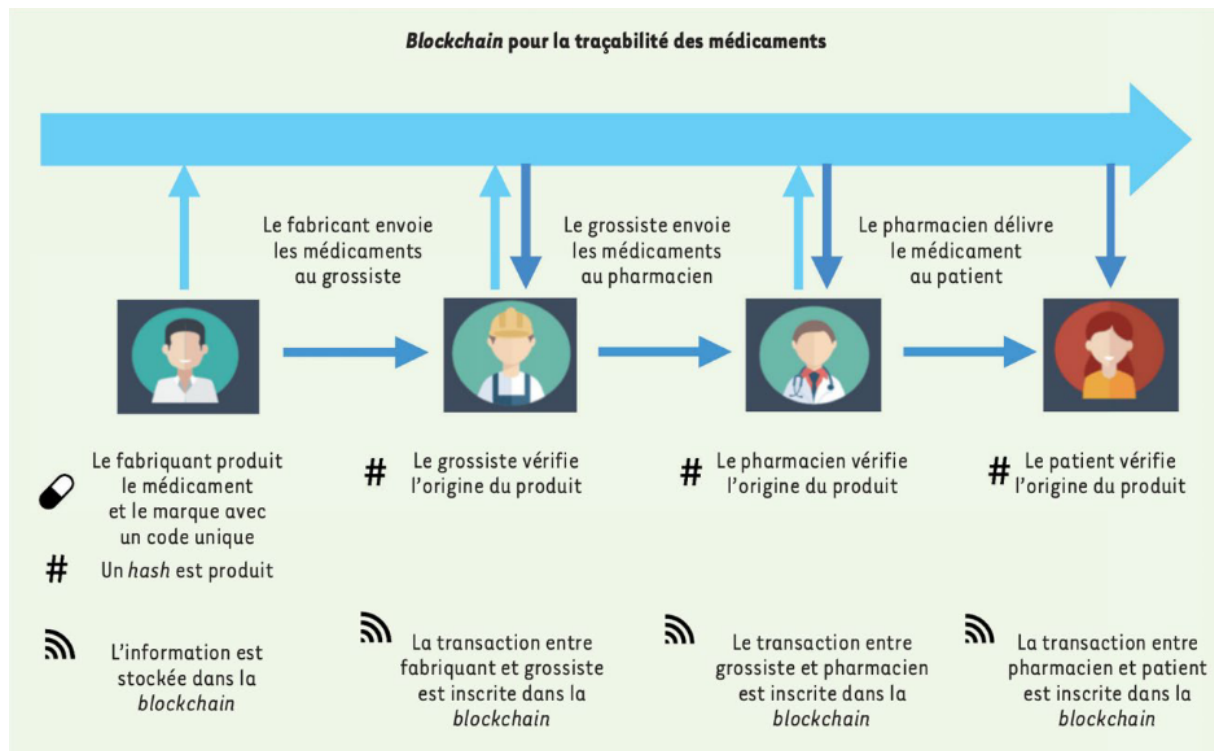


FIGURE 2.9 – La Blockchain pour la traçabilité des médicaments.

Sur l'image précédente, nous pouvons voir le parcours effectué par les médicaments tout au long de la chaîne d'approvisionnement pharmaceutique. Ce parcours est retracé dans la Blockchain jusqu'à l'arrivée du médicament au patient. Les interactions du produit avec chacune des parties prenantes ont généré un hash, celui-ci sera automatiquement stocké dans la Blockchain.

## 2.12 Les avantages de la Blockchain

**La rapidité des transactions :** la dématérialisation des échanges sur la Blockchain permet une validation rapide des blocs. Sur des plateformes comme Ethereum, cette validation peut se faire en quelques secondes, réduisant considérablement les délais de communication et de traitement des documents.

**La sécurisation des transactions :** la décentralisation de la Blockchain garantit la sécurité des informations et des transactions enregistrées dans son historique. En raison du fait que tous les utilisateurs possèdent une copie de chaque transaction, le risque de cyberattaque est considérablement réduit.

**L'amélioration de la traçabilité :** implique la mise en place de mesures visant à renforcer la capacité à suivre et à retracer les éléments d'un processus, d'un produit ou d'une activité. Cela vise à accroître la transparence, la visibilité et l'efficacité de la surveillance tout au long du cycle de vie ou du parcours d'un élément dans un système. Cet effort est souvent motivé par des considérations de sécurité, de qualité, de conformité réglementaire ou d'optimisation des processus. [12]



**La décentralisation** : la nature décentralisée de la Blockchain signifie qu’aucune autorité centrale ne contrôle l’ensemble du réseau. Cela réduit les risques de manipulation ou de défaillance d’un point central.

## 2.13 Les inconvénients de la Blockchain

**Consommation énergétique** : le principal inconvénient de la Blockchain est la haute consommation d’énergie, certains consensus comme la preuve de travail (POW) utilisée par Bitcoin, requièrent d’importants efforts informatiques et consomment beaucoup d’énergie. Cela a des implications environnementales et peut être perçu comme non durable.

**Modification des données** : un autre inconvénient des systèmes blockchain est qu’une fois les données ajoutées à la blockchain, il est très difficile de les modifier. Bien que cette immutabilité contribue à la stabilité du système, elle peut parfois être un inconvénient. La modification de données ou de code dans la blockchain est généralement une tâche complexe, souvent nécessitant un hard fork, où une nouvelle chaîne est créée tandis que l’ancienne est abandonnée.

**Stockage** : les registres décentralisés des blockchains ont tendance à devenir très volumineux au fil du temps. Par exemple, la blockchain Bitcoin requiert actuellement plus de 200 Go d’espace de stockage. La croissance actuelle de la taille de la blockchain semble surpasser la capacité des disques durs, créant ainsi le risque que le réseau perde des nœuds, car il devient difficile pour les individus de télécharger et de stocker le grand livre en raison de sa taille importante.

## 2.14 État de l’art

Dans la littérature, la Blockchain a pris une place prépondérante. De nombreux travaux scientifiques ont été menés pour définir et promouvoir l’utilisation de la Blockchain. Cette importance a également donné naissance à des projets innovants menés par des entreprises très connues, visant à exploiter les avantages de cette technologie dans le monde réel. Dans ce qui suit, nous présenterons un état de l’art de la littérature sur la Blockchain ainsi que les différents projets économiques associés dans divers secteurs et domaines d’application.

### 2.14.1 L’avancement de la Blockchain

En 2016, Les principes de la technologie Blockchain sont présentés dans le livre de **Don Tapscott et Alex Tapscott** en sept points principaux : intégrité du réseau, puissance distribuée, valeur comme incitatif, sécurité, confidentialité, droits préservés et inclusion.[5]

En 2016, le district de Chancheng (qui fait partie de la ville de Foshan, dans la province de Guangdong, en Chine) a créé la ” Guangdong Province Big Data Comprehensive Experimental Area.” Le gouvernement de Chancheng a collaboré avec une société de logiciels appelée 21ViaNet China pour établir la première plateforme de services d’administration en ligne utilisant la technologie Blockchain en Chine qui renforcera la confiance mutuelle entre le gouvernement, les entreprises et les citoyens.[10]



**Mattila Juri, Timo Seppälä et Jan Holmström** ont contribué en 2016 à une nouvelle compréhension des modèles de conception pour la gestion des informations sur le cycle de vie des produits par le biais de la technologie Blockchain. Un effort est fait pour analyser comment la technologie Blockchain pourrait être appliquée pour surmonter les problèmes de confiance numérique et de synchronisation des données liés aux architectures de gestion de l'information centrées sur le produit.[20]

En 2016, **Abeyratne et Monfared** ont fait le point sur l'état actuel de la technologie Blockchain et sur certaines de ses applications. Ils ont discuté de son potentiel dans la chaîne d'approvisionnement manufacturière et ont proposé une vision d'une future chaîne d'approvisionnement "prête pour la Blockchain". L'utilisation de la fabrication de boîtes en carton a servi d'exemple pour démontrer comment cette technologie peut être intégrée de manière efficace dans une chaîne d'approvisionnement mondiale.[20]

En 2017, **Muhammad Salek Ali, Koustabh Dolui et Fabio Antonelli** ont proposé un modèle d'accès décentralisé pour les données IoT, permettant aux appareils IoT de communiquer avec la Blockchain et avec un stockage de données en pair à pair.[16]

En 2017, **Toyoda, Mathiopoulos, Sasase et Ohtsuki** ont conçu un système de gestion de la propriété des produits basé sur Ethereum et utilisant la RFID et l'EPC pour permettre la traçabilité des produits dans la chaîne d'approvisionnement postérieure, et pour identifier les contrefaçons de produits.[16]

En 2018, **Haya Hasan et Khaled Salah** ont été l'un des rares à construire un modèle de preuve de livraison pour les actifs physiques, y compris les expéditions gérées par un ou plusieurs transporteurs. La chaîne conçue de contrats intelligents basés sur Ethereum permet la traçabilité des produits ainsi que le processus de récompense et de paiement pour l'acheteur et les transporteurs.[16]

En 2019, **Westerkamp, Victor, et Küpper** se sont concentrés sur la traçabilité des produits, consistant à créer une représentation numérique des marchandises physiques, dans le contexte des recherches portant sur les applications de la technologie Blockchain dans la gestion de la chaîne d'approvisionnement et la logistique. Ces chercheurs ont élargi la traçabilité d'un seul produit tout au long de la chaîne d'approvisionnement en proposant un système qui inclut les produits manufacturés et leurs composants, en utilisant une structure de jetons basée sur la blockchain.[16]

En 2019, **Suliman, Husain, Abououf, Alblooshi et Salah** ont discuté de la monétisation de ces données à l'aide d'une architecture de contrat intelligent Ethereum et de processus de paiement automatisés.[16]

En 2019, de nombreuses applications IoT ou Blockchain axées sur l'industrie ont été confrontées au défi du stockage de fichiers volumineux. Dans ce contexte, des réseaux de stockage P2P tels que IPFS (protocole de communication et de distribution de fichiers P2P) et Swarm (protocole de stockage et de distribution de fichiers décentralisé qui fonctionne en conjonction avec Ethereum) ont été proposés et sont de plus en plus intégrés dans les cas d'utilisation.[16]

Des géants bancaires tels que Morgan, UBS et d'autres ont établi leurs propres laboratoires de Blockchain, collaborant avec des plateformes de Blockchain et publiant diverses

études sur le sujet. Goldman Sachs a même déposé un brevet pour le règlement des transactions basé sur cette technologie. Parallèlement, des institutions financières telles que le Nasdaq, la Bourse de New York, la Depository Trust and Clearing Corporation des États-Unis, Visa et la (SWIFT) ont également étendu leurs initiatives dans le domaine de la Blockchain.

En 2022, IBM et Moderna ont annoncé leur collaboration visant à améliorer la chaîne d’approvisionnement des vaccins dans le but de renforcer la confiance dans les programmes de vaccination. Cette initiative vise à assurer une traçabilité totale et transparente du parcours du vaccin jusqu’au patient, en incluant les principes actifs. En outre, cette collaboration promet de résoudre les défis logistiques et réglementaires liés à la distribution des vaccins, notamment lors de situations de crise sanitaire.

#### 2.14.2 Les projets réalisés

Blockpharma a été fondée en 2016 pour objectif principal de garantir l’authenticité des médicaments tout au long de leur cycle de vie, depuis leur production jusqu’à leur distribution aux consommateurs. En utilisant des technologies de pointe telles que la blockchain et le machine learning, Blockpharma offre une solution robuste pour lutter contre la contrefaçon des médicaments qui représente un grave problème de santé publique à l’échelle mondiale.[13]

Le projet TradeLens Blockchain Shipping Solution représente une collaboration entre Maersk et IBM visant à surveiller les conteneurs maritimes grâce à une solution basée sur la blockchain (IBM and Maersk TradeLens Solution, 2018). Cette plateforme utilise également la blockchain pour assurer la traçabilité.[17]

En 2018, le projet UPS Blockchain Tracking Solution a été lancé. Cette initiative vise à mettre en place un système de gestion du suivi basé sur la technologie de la blockchain, couvrant l’ensemble du processus logistique, de la réception du colis à sa livraison, et le paiement.[17]

En 2018, le projet Smart Storage Containers a été initié dans le but de concevoir des conteneurs intelligents permettant un suivi efficace des marchandises, une simplification des procédures douanières, et la détection de contrefaçons en intégrant des objets connectés à une blockchain. Selon Hinckeldeyn, l’utilisation d’une autre blockchain notamment Hyperledger Sawtooth, est suggérée pour résoudre les problèmes de performance identifiés. Précisant que Hyperledger Sawtooth est une plateforme de blockchain open source développée par Linux Foundation. Elle offre des performances améliorées en termes de temps d’exécution des transactions et utilise un algorithme de consensus mieux adapté au contexte de l’IoT.[17]

En 2018, le projet AgriBlockIoT a été lancé, visant à intégrer l’IoT et la blockchain pour établir un registre transparent, tolérant aux pannes, contrôlable et exploitable dans un système de traçabilité appliqué au secteur agro-alimentaire. La principale piste de recherche du projet consiste à intégrer des objets directement dans les nœuds de la Blockchain.[17]

En 2019, le constructeur automobile Daimler, réputé pour sa marque Mercedes-Benz, a initié une expérimentation impliquant l’utilisation de la technologie Blockchain d’Ocean Protocol. Cette technologie de partage de données basée sur la Blockchain permet aux

entreprises de partager des données de manière sécurisée et transparente.[17]

Conflux est une Blockchain chinoise qui adopte une architecture similaire à Avalanche en utilisant une structure DAG appelée Tree-Graph. Cette conception architecturale permet d'atteindre une grande vitesse de transaction et une scalabilité améliorée. À partir du début de l'année 2022, Conflux a envisagé de passer d'un mécanisme de consensus entièrement basé sur la preuve de travail (PoW) à un système hybride combinant la preuve de travail et la preuve d'enjeu (PoS). Cette modification visait à améliorer l'efficacité énergétique de la blockchain tout en renforçant sa sécurité et sa décentralisation.[17]

### 2.14.3 Les domaines d'application futurs de la blockchain

**Domaine de santé :** La mise en œuvre de la technologie Blockchain pour l'utilisation dans les dossiers de santé électroniques examinera comment une partie prenante externe peut utiliser ou demander les dossiers médicaux d'un patient à l'hôpital ou à l'autorité sanitaire sans enfreindre la vie privée du patient.

La Blockchain révolutionne la traçabilité des médicaments, garantissant ainsi l'authenticité des produits, réduisant les risques de contrefaçon et renforçant la sécurité des patients grâce à une détection efficace des produits défectueux.

**Gestion des expéditions :** Un autre service qui pourrait être redéfini par la technologie Blockchain est le contrôle des conteneurs arrivant dans les ports. Au moment où un conteneur arrive au port, il pourrait être étiqueté avec un hachage cryptographique correspondant au dernier conteneur reçu. La valeur d'un système comme celui-ci réside dans sa capacité à garder automatiquement une trace de tous les conteneurs et à prévenir les erreurs telles que les changements d'informations spécifiques ou les incidents d'espionnage industriel.

**Titres fonciers :** La numérisation des titres fonciers présente plusieurs avantages pour la société. Premièrement, elle réduit la bureaucratie et la corruption associées au secteur immobilier. En utilisant un système basé sur la Blockchain, les utilisateurs peuvent consulter n'importe quel enregistrement de propriété gratuitement et en temps réel. De plus, l'authentification des titulaires de titres fonciers serait simplifiée, et les transferts de propriété nécessiteraient moins de capital. Un aspect crucial est que ce système open source permettrait aux utilisateurs de développer des applications pour améliorer l'accès aux dossiers.

## 2.15 Conclusion

En conclusion, ce chapitre a mis l'accent sur la Blockchain en tant que technologie transformative. Ses caractéristiques uniques, telles que la décentralisation, la sécurité et l'immutabilité des données, en font un outil potentiellement révolutionnaire pour de nombreux secteurs. La capacité de la Blockchain à garantir la transparence et la confiance dans les transactions et les enregistrements a le potentiel de transformer des industries entières, de la finance à la logistique, en passant par la santé et bien d'autres. De plus, les avancées continues dans le domaine de la Blockchain ouvrent la voie à de nouvelles innovations et applications pratiques. Par exemple, l'utilisation de contrats intelligents basés sur la Blockchain offre des opportunités pour l'automatisation et l'exécution sécurisée de

transactions complexes. L'avenir de la Blockchain semble donc prometteur, avec un potentiel énorme pour améliorer l'efficacité, la transparence et la sécurité dans de nombreux domaines industriels. Il est donc crucial de continuer à explorer et à développer cette technologie afin de réaliser pleinement son potentiel transformateur.

# Chapitre 3

## Mise en place du système de traçabilité

### 3.1 Introduction

La technologie Blockchain, souvent associée aux cryptomonnaies comme le Bitcoin, est une innovation majeure qui permet de sécuriser et de décentraliser le stockage des données. Elle fonctionne comme un grand livre numérique distribué, où chaque transaction ou événement est enregistré dans un bloc de données lié de manière cryptographique au bloc précédent, formant ainsi une chaîne immuable. Cette structure offre une transparence et une sécurité accrues, ce qui en fait une solution idéale pour des domaines nécessitant une traçabilité et une intégrité des données rigoureuses, tels que l'industrie pharmaceutique.

Ce chapitre se concentre sur la mise en place du système de traçabilité. Nous avons commencé par la conception des diagrammes de cas d'utilisation pour identifier les interactions entre les utilisateurs et le système. Ensuite, nous avons conçu une base de données robuste pour stocker les informations, puis modélisé une interface utilisateur intuitive. La réalisation du système a impliqué l'implémentation de la base de données, l'intégration de la technologie blockchain pour assurer une traçabilité infalsifiable, et le développement de l'interface utilisateur.

### 3.2 Conception du système de traçabilité visé

Dans le cadre du chapitre dédié à la conception de notre système de traçabilité, nous adoptons une approche méthodique et professionnelle afin de parvenir à une architecture robuste répondant aux exigences opérationnelles et aux besoins des utilisateurs. Cette démarche implique plusieurs étapes de modélisation.

Initialement, nous développons des modèles de fonctionnalité qui nous permettent de décrire en détail les différentes capacités opérationnelles du système. Grâce à l'utilisation de diagrammes de cas d'utilisation, chaque fonctionnalité est analysée dans ses interactions avec les différents acteurs du système, permettant ainsi d'identifier précisément les besoins fonctionnels et les scénarios d'utilisation à prendre en compte.

En parallèle, la conception des modèles de données vise à définir la structure et les relations des informations manipulées par le système. Nous utilisons les Modèles Conceptuels de Données (MCD) et les Modèles Logiques de Données (MLD) pour modéliser respectivement les entités, les attributs et les relations, offrant ainsi une représentation claire et

précise des données à traiter.

En ce qui concerne l'interface du système de traçabilité, nous proposons un schéma modèle assurant une intuitivité et une simplicité d'interaction avec le système, tout en gardant une expérience utilisateur fluide et conviviale. En conclusion la conception d'un système de traçabilité repose sur une approche structurée de modélisation fonctionnelle et de conception de données et d'interface, garantissant ainsi un système fiable performant et adapté aux besoins spécifiques des utilisateurs.

### 3.2.1 Conception du diagramme de cas d'utilisation

Avant de présenter les diagrammes d'utilisation proposés nous commençant d'abord par définir les notions de base reliées à la modélisation par diagramme de cas d'utilisation.

La première définition est celle du diagramme de cas d'utilisation qui est défini comme étant un outil essentiel dans le domaine du génie logiciel. Il représente la phase d'analyse des besoins visant à une compréhension approfondie des exigences du système, leur expression et leur formalisation. Cela englobe la description des fonctionnalités que le système offre à ses utilisateurs, qu'ils soient humains ou autres systèmes, ainsi que les relations qui peuvent exister entre eux telles que les inclusions, les utilisations ou les extensions. En d'autres termes il s'agit d'identifier les actions que le système doit accomplir pour répondre aux besoins des utilisateurs et de déterminer comment ces fonctionnalités interagissent les unes avec les autres.

Le diagramme de cas d'utilisation offre une représentation graphique des acteurs et de leurs cas d'utilisation, illustrant leurs interactions avec le système. Cette visualisation fournit une vue claire et précise des différents scénarios d'utilisation du système, permettant ainsi de comprendre les fonctionnalités offertes par le système et les différents acteurs impliqués dans son utilisation.

La deuxième notion à définir est celle de l'acteur qui est défini comme étant un rôle assumé par un utilisateur du système. Il peut s'agir d'une entité externe qu'elle soit humaine ou autre, qui interagit avec le système selon un rôle spécifique. Chaque acteur est identifié par un nom correspondant à la fonction qu'il exerce dans le cadre du système. De plus, il est possible de fournir une description textuelle détaillée du rôle de chaque acteur en précisant ainsi ses responsabilités et ses interactions attendues avec le système.

La troisième définition est celle de la notion du cas d'utilisation qui est une représentation des actions qu'un système réalise pour répondre aux besoins spécifiques du client. Chaque cas d'utilisation décrit une séquence d'interactions entre l'acteur et le système correspondant à une fonction ou un scénario observable par l'utilisateur. L'objectif principal d'un cas d'utilisation est de permettre à l'utilisateur d'atteindre un certain but ou de réaliser une tâche spécifique de manière efficace et satisfaisante. Il est crucial que les cas d'utilisation soient bien définis, non redondants et ne se chevauchent pas afin de garantir une conception claire et cohérente du système.

Enfin, la dernière définition est celle des relations qui peuvent être l'une de quatre types : les associations qui relient les acteurs aux cas d'utilisation (uses), les relations d'inclusions entre cas d'utilisations (include), les relations d'extension toujours entre cas d'utilisation (extends) et les relations de généralisation entre acteurs (héritage).

La figure suivante est un exemple explicatif des différentes définitions déjà cité.

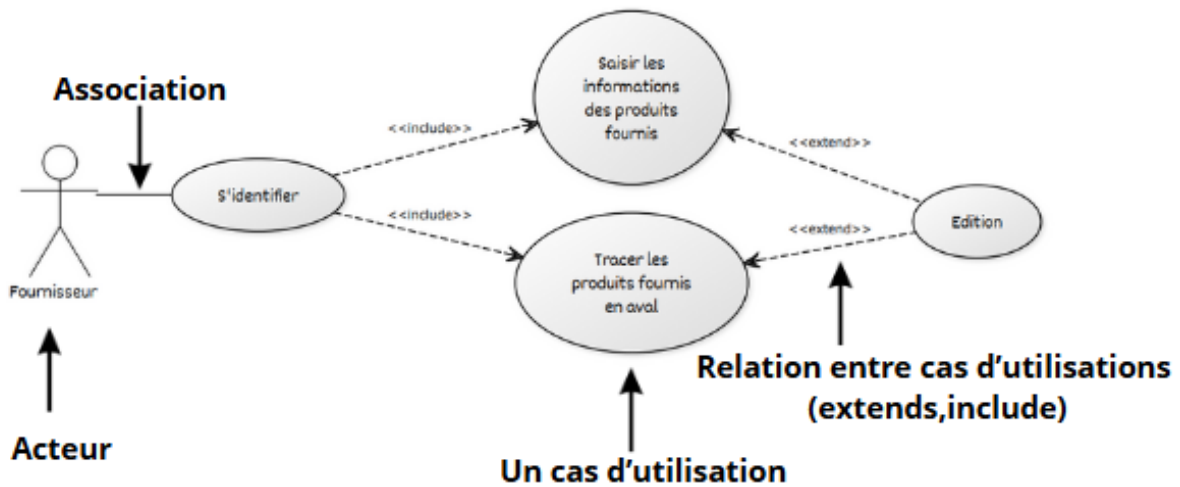


FIGURE 3.1 – Exemple explicatif du diagramme de cas d'utilisation dufournisseur.

### Les diagrammes de cas d'utilisation proposés :

Les diagrammes de cas d'utilisation sont des outils puissants pour représenter les interactions entre les différents acteurs et notre système de traçabilité des produits pharmaceutiques. Chaque acteur parmi les sept (Fournisseur, Laboratoire, Grossiste, Pharmacie, Client, Livreur et Gouvernement) est examiné individuellement mettant en évidence ses interactions spécifiques avec le système.

À travers cette approche nous allons détailler chaque aspect des sept diagrammes de cas d'utilisation offrant ainsi une compréhension exhaustive des fonctionnalités et des exigences du système tout en facilitant la communication entre les parties prenantes de projet.

#### A. Diagramme de cas d'utilisation de l'acteur fournisseur :

La figure suivante montre les différentes interactions de l'acteur fournisseur avec le système. Le fournisseur commence par s'identifier afin de garantir l'accès uniquement aux utilisateurs autorisés et protège les informations. Une fois connecté le fournisseur est responsable de la saisie des détails des matières premières à fournir.

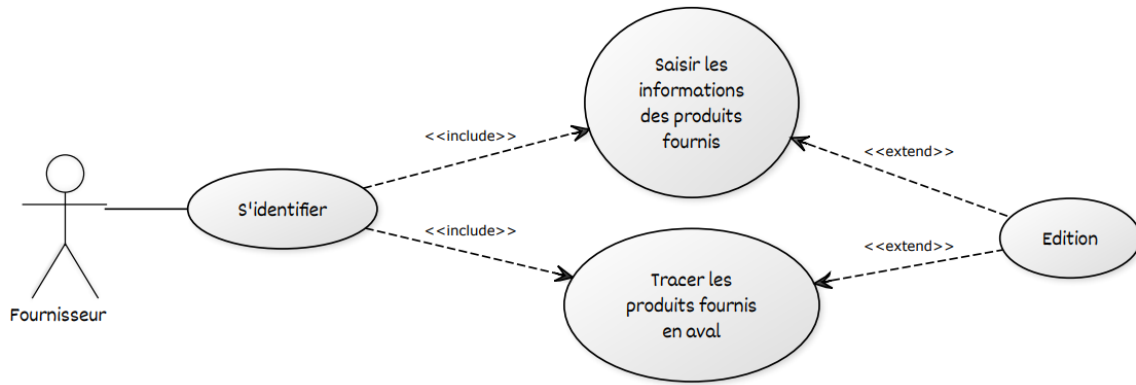


FIGURE 3.2 – Diagrammes de cas d’utilisation du fournisseur.

De même, le fournisseur peut assurer la traçabilité en aval de la matière première fournie. La saisie et la traçabilité incluent obligatoirement l’identification du fournisseur dans le système (d’où la relation includes). Cependant, l’édition des informations saisies et de la traçabilité peut être sollicitée par le fournisseur sous certaines conditions (nécessité d’impression pour archivage, etc.), afin d’optimiser le fonctionnement du système (d’où la relation extends).

**B. Diagramme de cas d’utilisation de l’acteur laboratoire :**

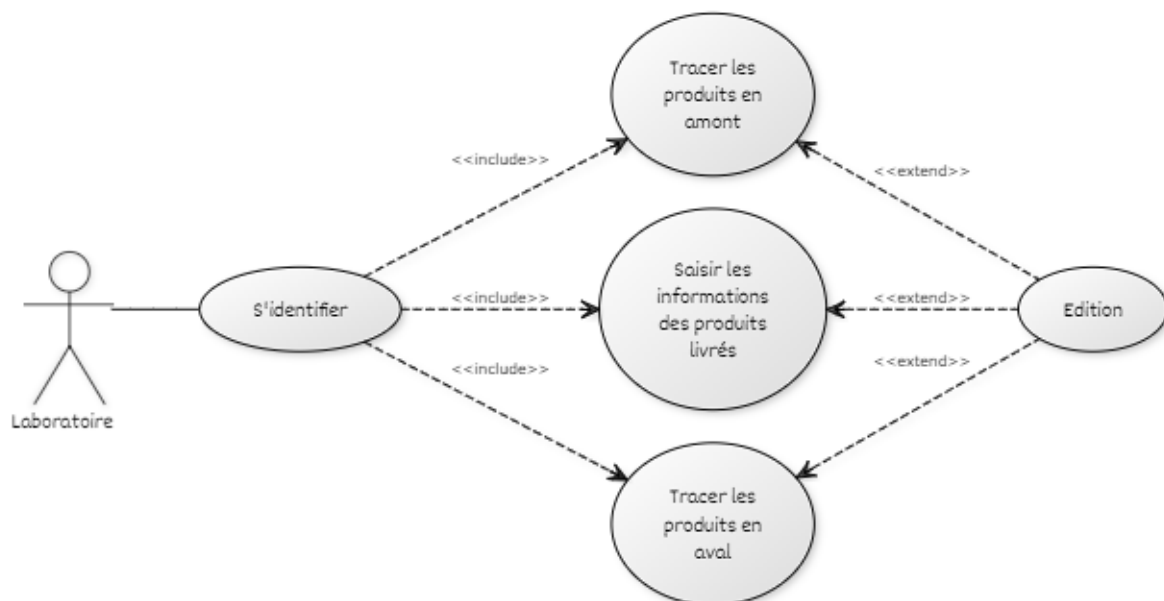


FIGURE 3.3 – Diagrammes de cas d’utilisation du laboratoire.

La figure précédente montre les différentes interactions de l’acteur laboratoire avec le système. Le laboratoire commence par s’identifier afin de garantir l’accès uniquement aux



utilisateurs autorisés et de protéger les informations. Une fois connecté, le laboratoire est responsable de la saisie des informations des produits livrés et de la traçabilité des produits en amont et en aval. Cette saisie inclut obligatoirement l'identification du laboratoire dans le système (d'où la relation includes).

Cependant, l'édition des informations saisies et de la traçabilité est sollicitée par le laboratoire sous certaines conditions (comme la nécessité d'impression pour archivage, etc.) afin d'étendre l'utilisation du système vers son fonctionnement optimal (d'où la relation extends).

### C. Diagramme de cas d'utilisation de l'acteur grossiste répartiteur :

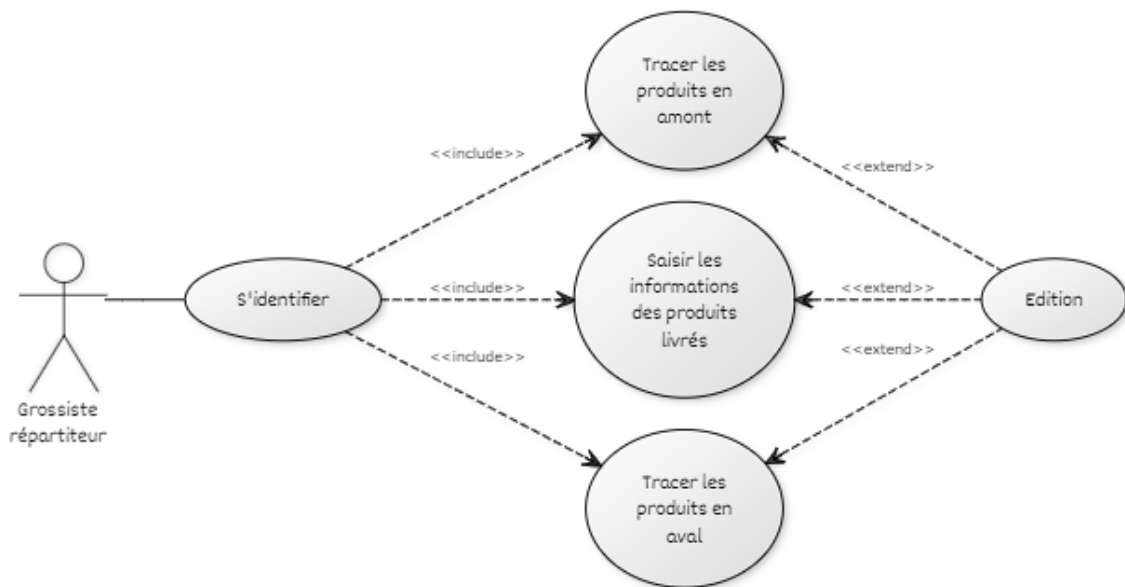


FIGURE 3.4 – Diagrammes de cas d'utilisation du grossiste répartiteur.

La figure précédente illustre les différentes interactions de l'acteur grossiste répartiteur avec le système. Le grossiste commence par s'identifier afin de garantir l'accès uniquement aux utilisateurs autorisés et de protéger les informations. Une fois connecté, le grossiste est responsable de la saisie des informations des produits livrés. De même, le grossiste peut assurer la traçabilité des produits en amont et en aval.

La saisie des informations des produits livrés inclut obligatoirement l'identification du grossiste auprès du système (d'où la relation includes). De même, la traçabilité des produits en amont et en aval nécessite également que le grossiste soit identifié (d'où la relation includes). Cependant, l'édition des informations saisies et la traçabilité sont sollicitées par le grossiste sous certaines conditions (comme la nécessité d'impression pour archivage, etc.) afin d'étendre l'utilisation du système vers son fonctionnement optimal (d'où la relation extends).

**D. Diagramme de cas d'utilisation de l'acteur pharmacien :**

La figure suivante montre les différentes interactions de l'acteur pharmacien avec le système. Le pharmacien commence par s'identifier afin de garantir l'accès uniquement aux utilisateurs autorisés et de protéger les informations. Une fois connecté, le pharmacien est responsable de la saisie des informations des produits vendus. De même, le pharmacien peut assurer la traçabilité des produits reçus en amont.

La saisie des informations des produits vendus inclut obligatoirement l'identification du pharmacien auprès du système (d'où la relation includes). De même, la traçabilité des produits reçus en amont nécessite également que le pharmacien soit identifié (d'où la relation includes). Cependant, l'édition des informations saisies et la traçabilité est sollicitée par le pharmacien sous certaines conditions (comme la nécessité d'impression pour archivage, etc.) afin d'étendre l'utilisation du système vers son fonctionnement optimal (d'où la relation extends).

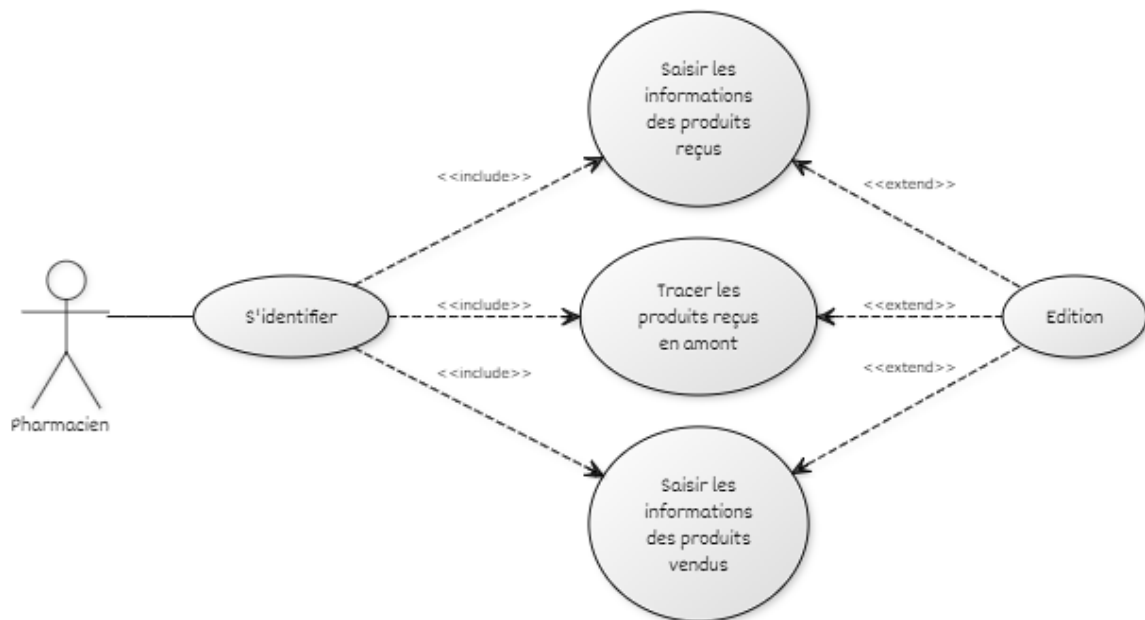


FIGURE 3.5 – Diagrammes de cas d'utilisation du pharmacien.

**E. Diagramme de cas d'utilisation de l'acteur livreur :**

La figure suivante montre les différentes interactions de l'acteur livreur avec le système. Le livreur commence par s'identifier afin de garantir l'accès uniquement aux utilisateurs autorisés et de protéger les informations. Une fois connecté, le livreur est responsable de la saisie des informations des produits livrés. De même, le livreur peut tracer les informations des produits livrés. La saisie des informations des produits livrés inclut obligatoirement l'identification du livreur auprès du système (d'où la relation includes). De même, la traçabilité des informations des produits livrés nécessite également que le livreur soit identifié (d'où la relation includes).

Cependant, l'édition des informations saisies et vérifiées est sollicitée par le livreur sous

certaines conditions (comme la nécessité d'impression pour archivage, etc.) afin d'étendre l'utilisation du système vers son fonctionnement optimal (d'où la relation extends).

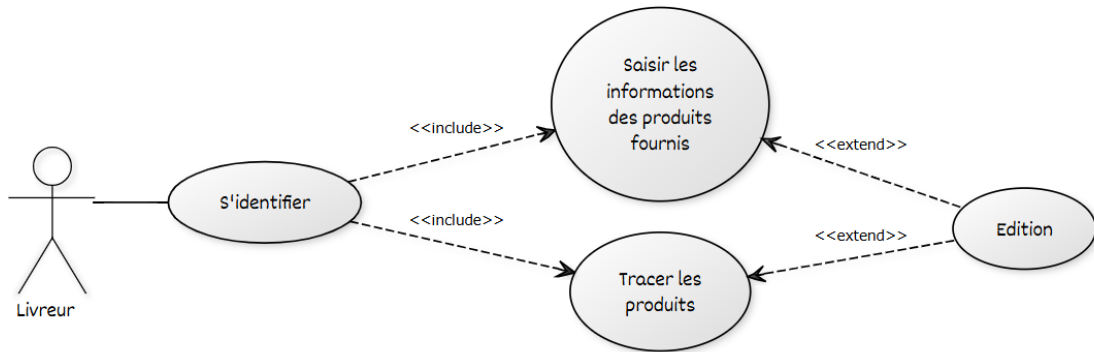


FIGURE 3.6 – Diagrammes de cas d'utilisation du livreur.

#### F. Diagramme de cas d'utilisation de l'acteur patient :

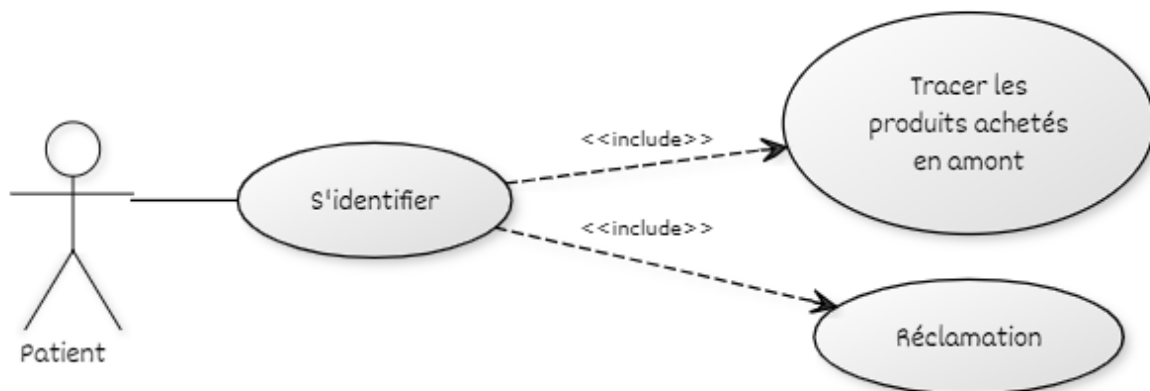


FIGURE 3.7 – Diagrammes de cas d'utilisation du client.

La figure précédente montre les différentes interactions de l'acteur client avec le système. Le client commence par s'identifier afin de garantir l'accès uniquement aux utilisateurs autorisés et de protéger les informations. Une fois connecté, le client peut assurer la traçabilité d'un produit acheté en amont. De même, le client peut faire une réclamation concernant un produit acheté.

La traçabilité d'un produit acheté en amont inclut obligatoirement l'identification du client auprès du système (d'où la relation includes). De même, la réclamation nécessite également que le client soit identifié (d'où la relation includes). Cependant, l'édition des informations de traçabilité et de réclamation est sollicitée par le client sous certaines conditions (comme la nécessité d'impression pour archivage, etc.) afin d'étendre l'utilisa-

tion du système vers son fonctionnement optimal (d'où la relation extends).

### G. Diagramme de cas d'utilisation de l'acteur gouvernement :

La figure suivante montre les différentes interactions de l'acteur gouvernement avec le système. Le gouvernement commence par s'identifier afin de garantir l'accès uniquement aux utilisateurs autorisés et de protéger les informations. Une fois connecté, le gouvernement peut assurer la traçabilité d'un produit. De même, le gouvernement peut rédiger un rapport.

La traçabilité d'un produit inclut obligatoirement l'identification du gouvernement auprès du système (d'où la relation includes). De même, la rédaction d'un rapport nécessite également que le gouvernement soit identifié (d'où la relation includes). Cependant, l'édition des informations de traçabilité et de rédaction de rapport est sollicitée par le gouvernement sous certaines conditions (comme la nécessité d'impression pour archivage, etc.) afin d'étendre l'utilisation du système vers son fonctionnement optimal (d'où la relation extends).

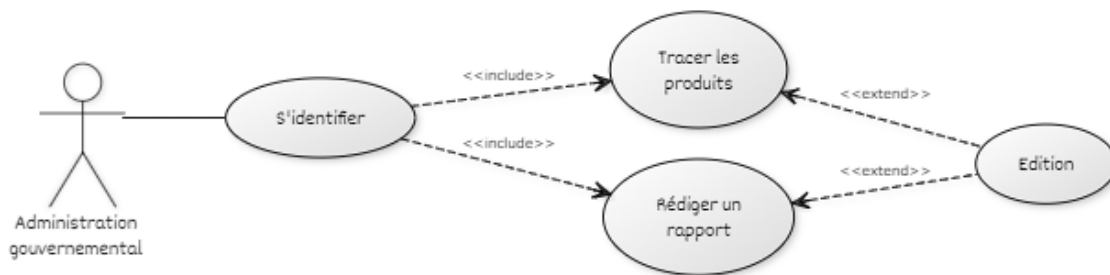


FIGURE 3.8 – Diagrammes de cas d'utilisation du gouvernement.

### 3.2.2 Conception de la base de données

La mise en place d'une base de données (BDD) est une étape cruciale dans notre développement logiciel, assurant une organisation efficace et une gestion précise des données. Tout commence par la création d'un Modèle Conceptuel des Données (MCD) qui offre une représentation abstraite des principaux composants du système et de leurs interactions. En identifiant les entités clés telles que les fournisseurs, les laboratoires, les grossistes et les pharmacies, ainsi que les relations qui les lient, le MCD fournit une vision d'ensemble du système facilitant la compréhension des besoins en données par les développeurs.

Une fois le MCD établi, vient ensuite la création du Modèle Logique des Données (MLD), une étape de transition vers un modèle spécifique au système de gestion de base de données (SGBD) utilisé. Chaque entité du MCD est transformée en une table dans le MLD, avec des attributs définissant ses caractéristiques distinctives. Les relations entre ces tables sont établies à l'aide de clés étrangères, garantissant une cohérence et une interconnexion fluides des données entre les différentes entités. De plus, des contraintes

d'intégrité telles que les clés primaires et les clés étrangères sont définies pour assurer la fiabilité et la stabilité du système dans son ensemble.

Le MCD et le MLD se complètent mutuellement dans notre processus de conception de la BDD. Tandis que le MCD offre une vue conceptuelle du système, mettant en lumière les entités principales et leurs relations, le MLD se concentre sur la traduction de ces concepts en une structure de base de données opérationnelle. Ensemble, ces deux modèles fournissent un cadre robuste pour le stockage, la gestion et l'utilisation efficace des données au sein de notre système logiciel, permettant ainsi de passer d'une vision abstraite à une implémentation concrète des données.

**A- Les modèles conceptuelles de données proposés :**

Afin d'organiser et de faciliter la tâche de modélisation de données, on a établi un modèle conceptuelle de données relié à chaque étape de livraison de la chaîne de produits pharmaceutiques, en plus d'un modèle conceptuel de données représentant l'identification des acteurs.

**a- Modèles conceptuelles de données Fournisseur Laboratoire :**

Le premier modèle MCD modélise les données reliées à la livraison de la matière première du fournisseur vers le laboratoire. La figure ci-dessous montre les différentes entités et associations de cette première étape.

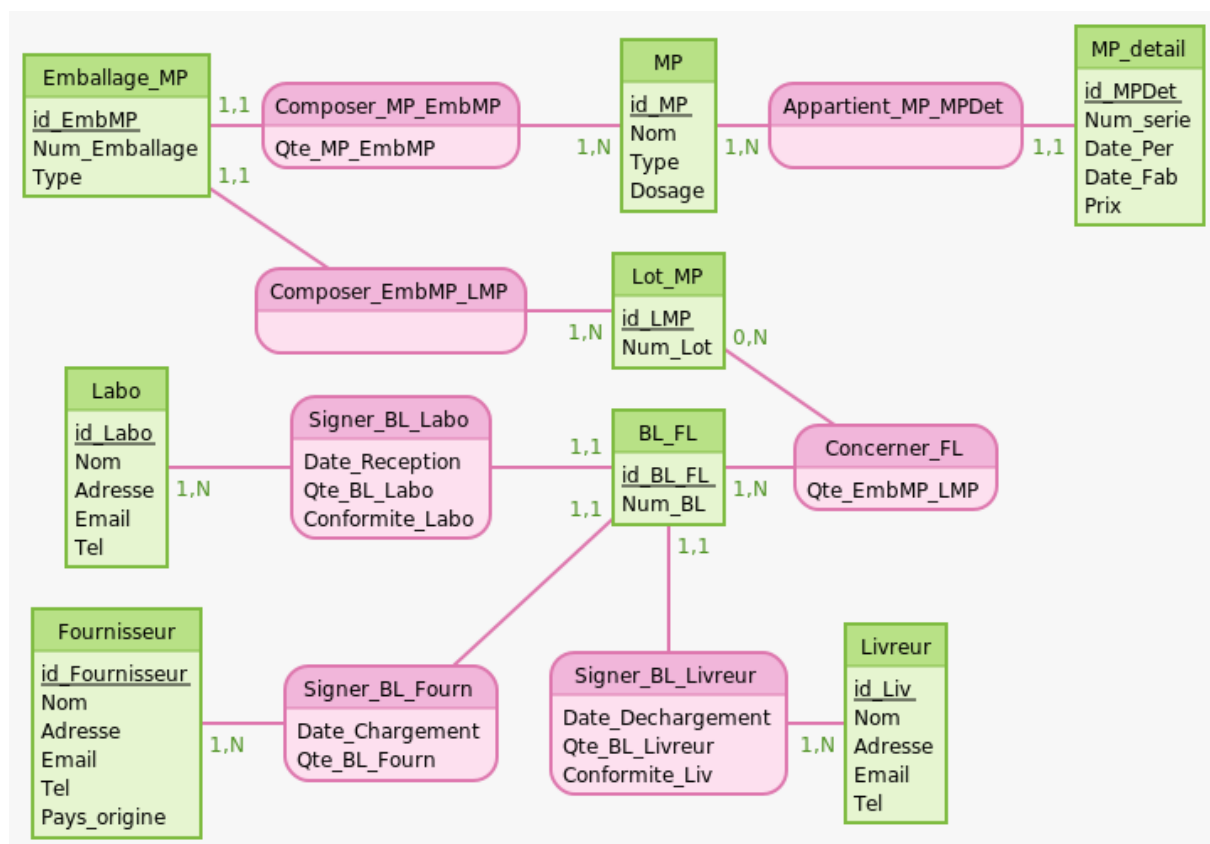


FIGURE 3.9 – Modèle conceptuel de données Fournisseur Laboratoire.

Le MCD précédent modélise les trois acteurs fournisseur, laboratoire et livreur à l'aide d'entités ou chaque entité possède un identifiant permettant de différencier entre les différentes instances de ces acteurs (comme exemple on ne peut pas trouver deux fournisseurs ayant le même identifiant). Chaque entité possède aussi des attributs qui caractérisent chaque acteur (comme exemple un laboratoire possède un nom, une adresse et un numéro de téléphone). Il modélise aussi des associations entre les entités. Comme exemple, l'association Signer\_BL\_Labo relie l'entité laboratoire avec l'entité bon de livraison (BL\_FL) reflétant que chaque instance de laboratoire peut signer plusieurs bons de livraisons avec la date de réception, la quantité reçue et la conformité de la matière première reçue par rapport à celle livrée par le fournisseur via le livreur.

**b- Modèles conceptuelles de données Laboratoire Grossiste :**

Le MCD suivant représente les trois acteurs : laboratoire, grossiste et livreur, en utilisant des entités, chacune possédant un identifiant unique pour différencier les différentes instances de ces acteurs (par exemple, deux laboratoires ne peuvent pas avoir le même identifiant). Chaque entité comporte des attributs qui caractérisent chaque acteur. Par exemple, un livreur a un nom, une adresse, un mail et un numéro de téléphone.

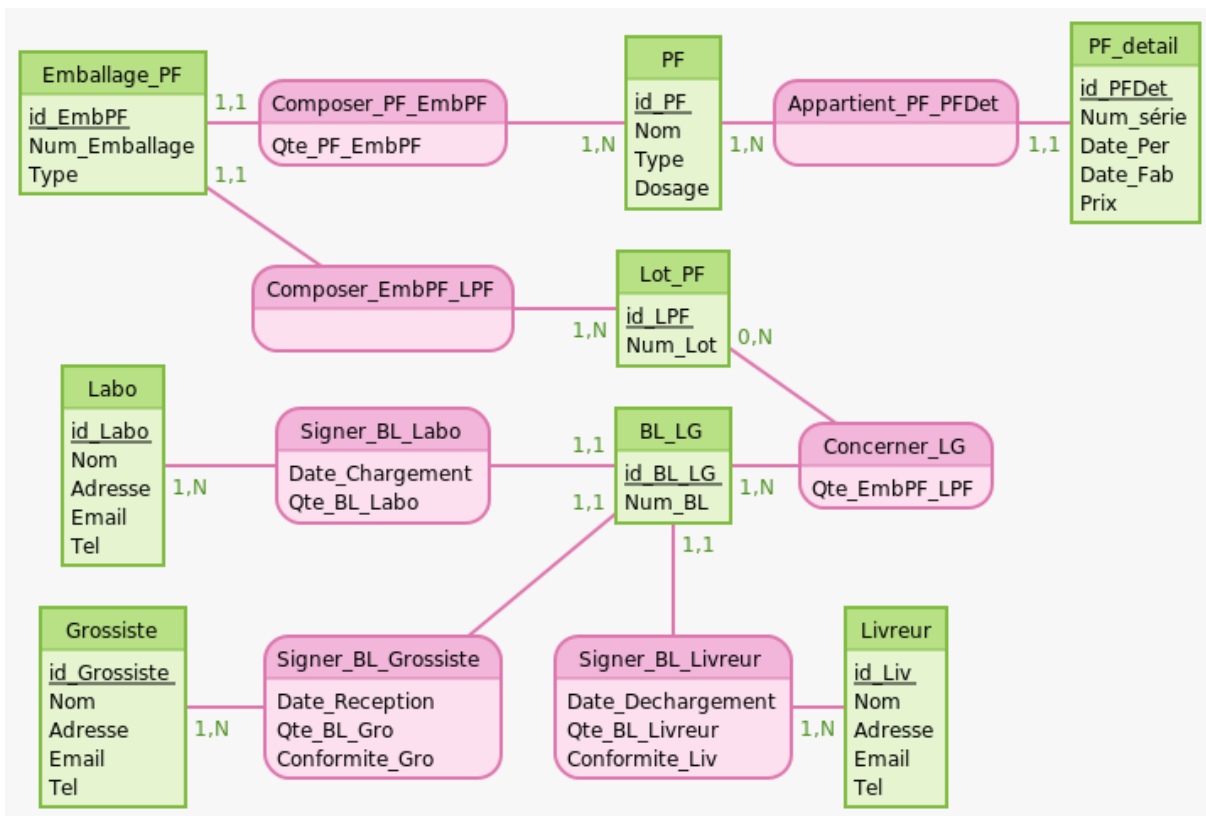


FIGURE 3.10 – Modèle conceptuel de données Laboratoire Grossiste.

Ce MCD illustre également des associations entre les entités. Par exemple, l'association Composer-EmbPF-LPF relie l'entité Emballage\_PF à l'entité Lot\_PF. Cela montre que chaque lot de produit fini peut contenir plusieurs emballages, avec une quantité spécifique d'emballages associée à chaque lot. Par ailleurs, chaque emballage est lié à un lot de produit fini spécifique, chaque emballage et chaque lot ayant un identifiant unique.

c- Modèles conceptuelles de données Grossiste Pharmacie :

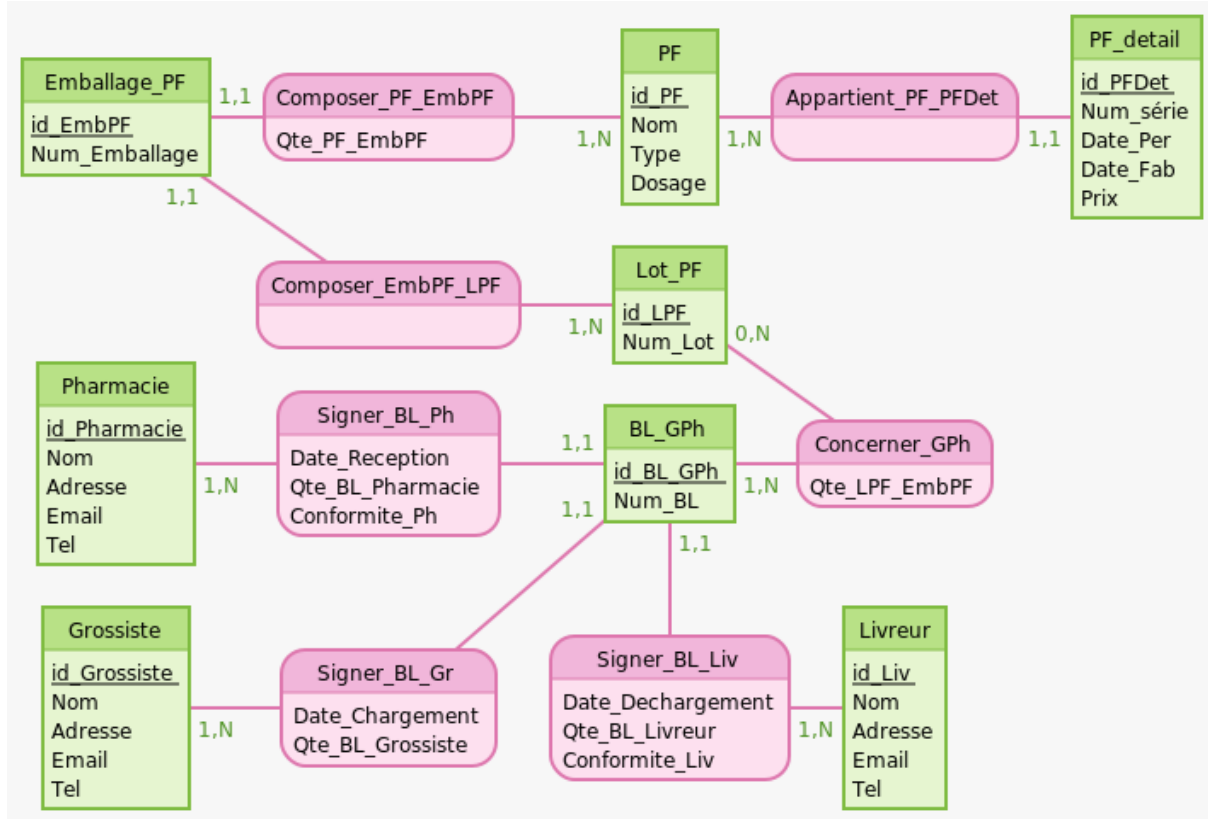


FIGURE 3.11 – Modèle conceptuel de données Grossiste Pharmacie.

Le MCD précédent représente les trois acteurs : pharmacie, grossiste et livreur, à l'aide d'entités, chacune dotée d'un identifiant unique permettant de distinguer les différentes instances de ces acteurs (par exemple, il est impossible d'avoir deux pharmacies avec le même identifiant). Chaque entité possède également des attributs qui la caractérisent (par exemple, un produit fini a un nom, un type et un dosage). Il démontre également des associations entre les entités. Par exemple, l'association Signer\_BL.Ph relie l'entité Pharmacie à l'entité BL\_GPh, ce qui signifie que chaque pharmacie peut signer plusieurs bons de livraison, en enregistrant la date de réception, la quantité reçue et la conformité des produits par rapport à ceux livrés par le grossiste.

**d- Modèles conceptuelles de données Pharmacie Client :**

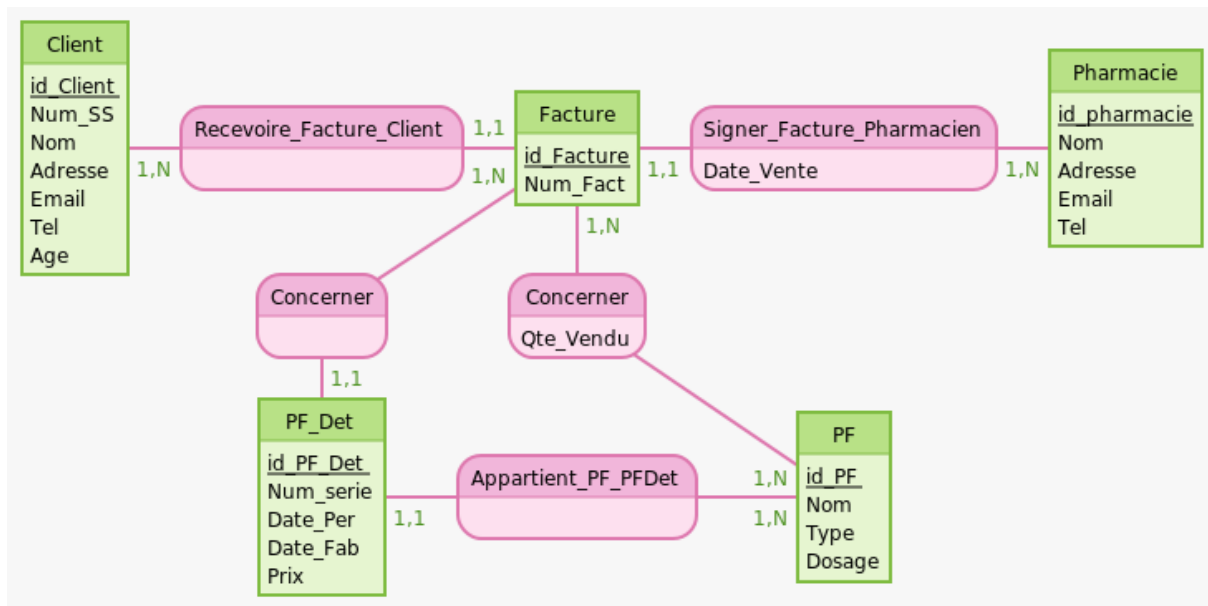


FIGURE 3.12 – Modèle conceptuel de données Pharmacie Client.

Le MCD précédent modélise les deux acteurs pharmacie et client à l'aide d'entités où chaque entité possède un identifiant permettant de différencier entre les différentes instances de ces acteurs (comme exemple, on ne peut pas trouver deux clients ayant le même identifiant). Chaque entité possède aussi des attributs qui la caractérisent (comme exemple un client possède un numéro de sécurité sociale, un nom, une adresse, un mail, un numéro de téléphone et l'âge).

Ce MCD représente également des associations entre les entités. Par exemple, l'association Recevoir\_Facture\_Client lie l'entité Client à l'entité Facture, indiquant que chaque client peut recevoir plusieurs factures, chacune ayant un numéro unique. De plus, l'association Signer\_Facture\_Pharmacien relie l'entité Pharmacie à l'entité Facture, précisant que chaque pharmacien peut signer plusieurs factures en enregistrant la date de vente. Enfin, l'association Concerner connecte l'entité Facture à l'entité PF\_detail, montrant que chaque facture peut inclure plusieurs produits finis avec la quantité vendue pour chacun.

**e- Modèles conceptuelles de données identification :**

Le dernier MCD représente l'identification et l'authentification des acteurs via l'entité centrale Compte. Chaque acteur (Pharmacien, Labo, Client, Livreur, Fournisseur, Gros-siste, Gouvernement) est représenté par une entité distincte avec des attributs spécifiques pour les identifier (comme : id, Nom, Adresse, Email, Tel). Chaque entité acteur est reliée à une seule instance de Compte par des associations nommées (par exemple, Posséder\_C\_PH pour Pharmacien), toutes ayant une cardinalité de (1,1) des deux côtés ce qui signifie qu'un acteur possède une et une seule instance de compte et chaque compte est lié à une seule instance d'un acteur.

Ce modèle garantit que chaque acteur possède un compte unique et que chaque compte est lié à un seul acteur, assurant une authentification unique et sécurisée.



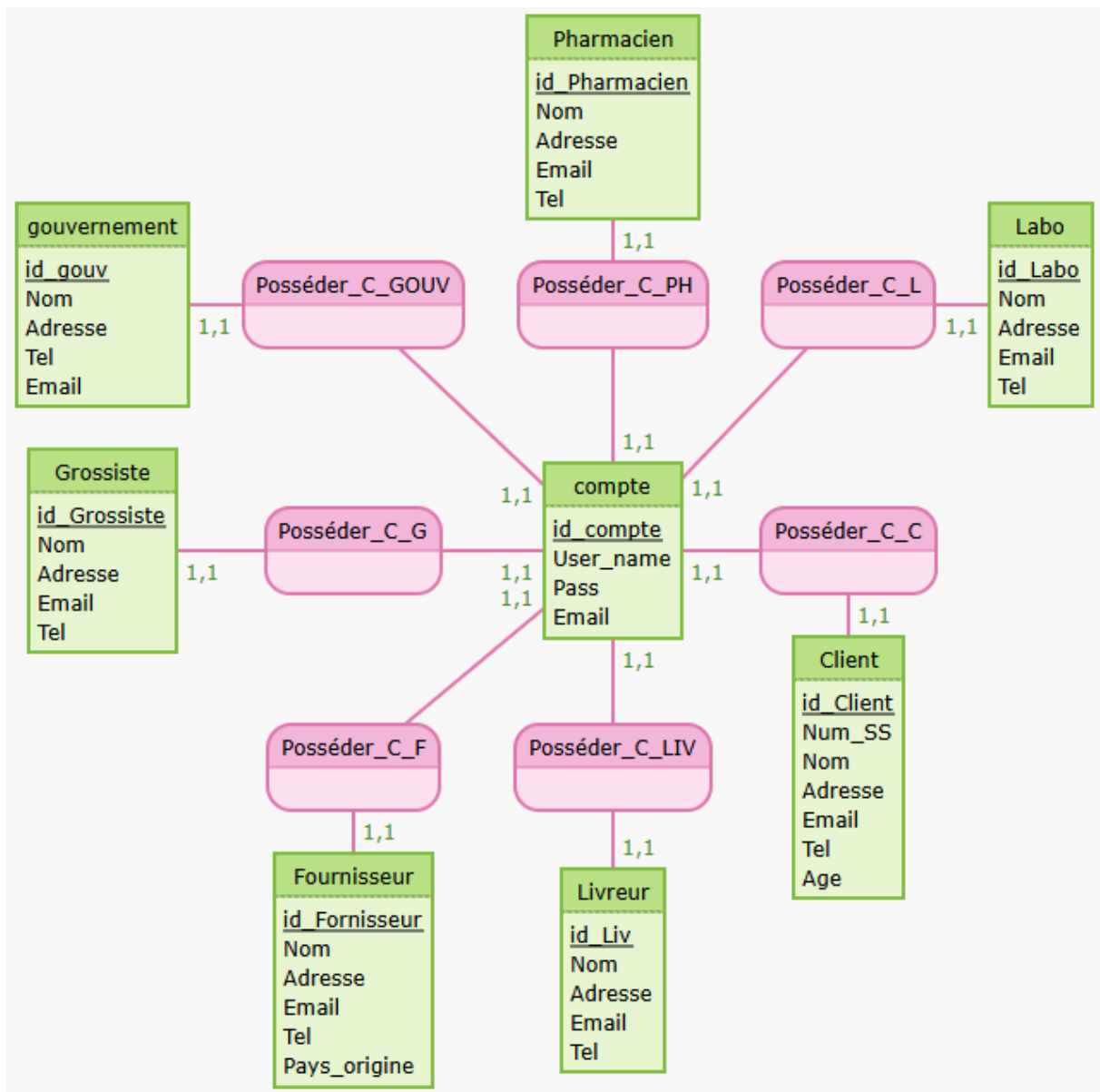


FIGURE 3.13 – Modèle conceptuel de données d'identification.

### B- Les modèles logiques de données obtenus :

Après avoir modélisé la réalité du terrain à travers les modèles conceptuels de données proposés, on procède à la conversion de ces modèles en modèles qui prennent en compte la structure de programmation porteuse des données (la table). Ces modèles sont appelés modèles logiques de données relationnels (le mot "relation" signifie la table).

La conversion des modèles conceptuels de données en modèles logiques de données est désignée par le terme modélisation logique. Cette dernière repose sur des règles bien définies qui se basent sur le type des associations en matière de cardinalités. On résume dans ce qui suit ces règles de conversion :

- Chaque entité devient une table et l'identifiant de l'entité devient une clé primaire (permettant d'identifier de manière unique chaque ligne de la table) de celle-ci.

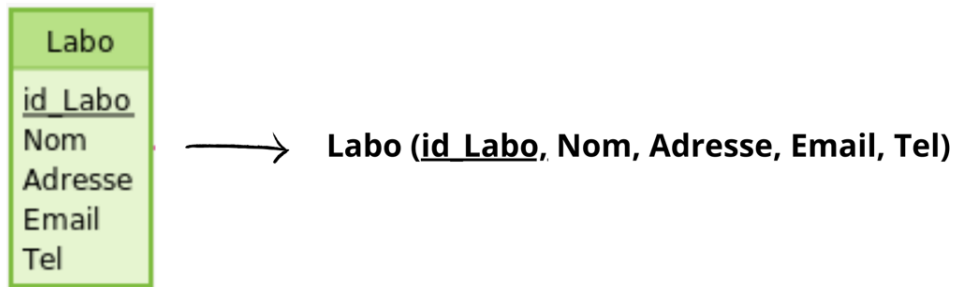


FIGURE 3.14 – Exemple de conversion d'une entité.

- Dans le cas d'une association de type N,N (les cardinalités maximales aux deux extrémités de l'association sont égales à N), l'association devient une table dont la clé primaire est composée des identifiants des deux entités reliées par cette association, et chacun de ces identifiants devient une clé étrangère. La figure suivante est un exemple de cette conversion.

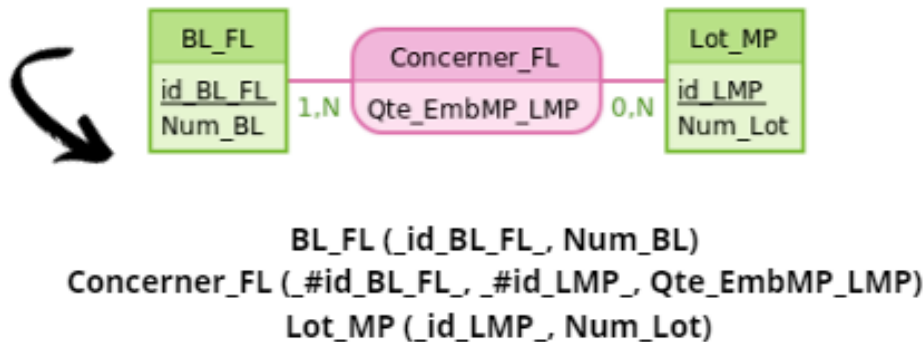


FIGURE 3.15 – Exemple de règle de conversion d'une association de type NN.

- Dans le cas d'une association de type 1,N (la cardinalité maximale à une extrémité est égale à 1 et égale à N à l'autre), la clé primaire de la table qui est du côté de la cardinalité maximale égale à N devient une clé étrangère dans la table qui est du côté de la cardinalité maximale égale à 1.

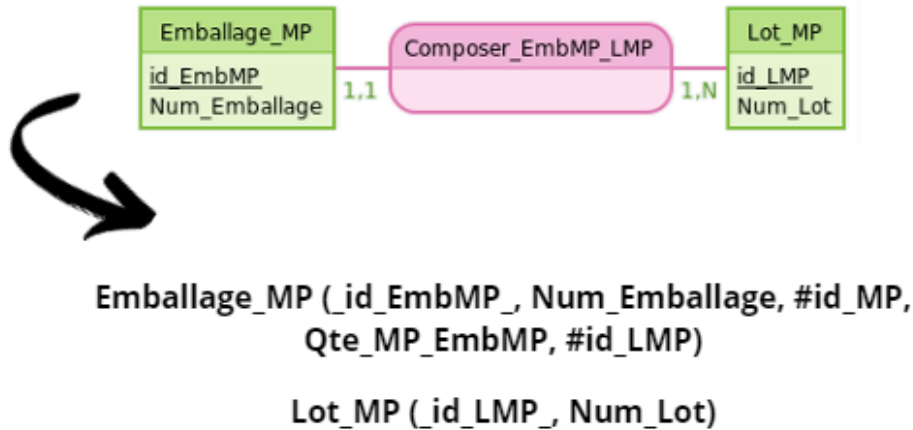


FIGURE 3.16 – Exemple de règle de conversion d’une association de type 1N.

- Dans l’exemple suivant nous avons deux entités : Compte et Grossiste. Chaque Grossiste avoir un seul compte et chaque compte correspond à un seul Grossiste. L’association entre Compte et Grossiste est de type 1,1. Cela signifie qu’un Grossiste possède un compte unique et que chaque compte est lié à un seul Grossiste.

Pour convertir cette association 1,1 en un modèle relationnel, nous avons deux choix principaux : incorporer la clé primaire de la table Compte comme clé étrangère dans la table Grossiste, ou incorporer la clé primaire de la table Grossiste comme clé étrangère dans la table Compte. Pour cet exemple, nous allons utiliser la première option.

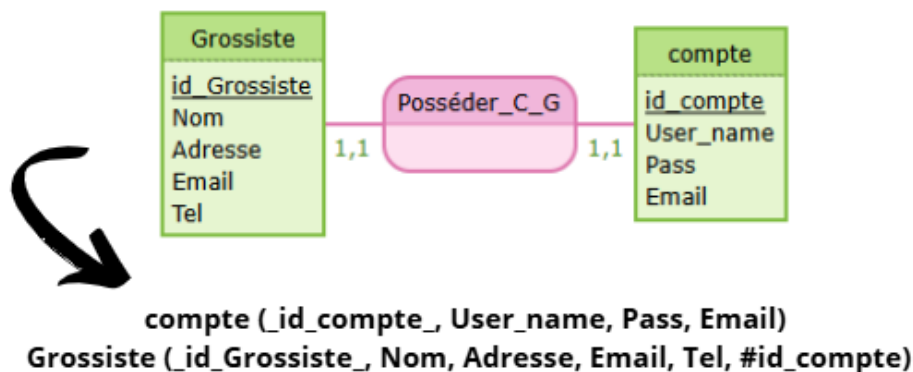


FIGURE 3.17 – Exemple de règle de conversion d’une association de type 11.

En appliquant les règles de conversion déjà citées sur les cinq modèles conceptuels de données, nous aboutissons à quatre modèles logiques de données.

#### a- Le modèles logiques de données fournisseur laboratoire :

La figure précédente représente le premier modèle logique de données obtenu. Dans ce modèle, chaque table possède une clé primaire unique permettant de différencier ses enregistrements (par exemple, on ne peut pas trouver deux laboratoires ayant la même clé primaire id\_Labo).

- BL\_FL (\_id\_BL\_FL\_, Num\_BL, #id\_Labo, Date\_Reception, Qte\_BL\_Labo, Conformance\_Labo, #id\_Fournisseur, Date\_Chargement, Qte\_BL\_Fourn, #id\_Liv, Date\_Dechargement, Qte\_BL\_Livreur, Conformance\_Liv)
- Concerner\_FL (\_#id\_BL\_FL\_, \_#id\_LMP\_, Qte\_EmbMP\_LMP)
- Emballage\_MP (\_id\_EmbMP\_, Num\_Emballage, Type, #id\_MP, Qte\_MP\_EmbMP, #id\_LMP)
- Fournisseur (\_id\_Fournisseur\_, Nom, Adresse, Email, Tel, Pays\_origine)
- Labo (\_id\_Labo\_, Nom, Adresse, Email, Tel)
- Livreur (\_id\_Liv\_, Nom, Adresse, Email, Tel)
- Lot\_MP (\_id\_LMP\_, Num\_Lot)
- MP (\_id\_MP\_, Nom, Type, Dosage)
- MP\_detail (\_id\_MPDet\_, Num\_serie, Date\_Per, Date\_Fab, Prix, #id\_MP)

FIGURE 3.18 – Modèle logique de donnée fournisseur laboratoire.

On voit bien aussi qu'il y a des tables possédant des clés étrangères vers des clés primaires, ce qui garantit le lien entre les tables (par exemple, la table Emballage\_MP contient la clé étrangère #id\_LMP vers la clé primaire id\_LMP de la table Lot\_MP, ce qui garantit que chaque emballage de matière première est relié au lot qui le contient).

#### **b- Le modèles logiques de données laboratoire grossiste :**

La figure suivante représente le modèle logique de données obtenu du laboratoire grossiste. Dans ce modèle, chaque table possède une clé primaire unique permettant de différencier ses enregistrements (par exemple, on ne peut pas trouver deux emballages de produits finis ayant la même clé primaire id\_EmbPF).

On observe également que certaines tables possèdent des clés étrangères pointant vers des clés primaires, ce qui assure le lien entre les tables (par exemple, la table Emballage\_PF contient la clé étrangère #id\_LPF qui pointe vers la clé primaire id\_LPF de la table Lot\_PF, garantissant ainsi que chaque Lot PF est relié au PF correspondant).

- BL\_LG (\_id\_BL\_LG\_, Num\_BL, #id\_Labo, Date\_Chargement, Qte\_BL\_Labo, #id\_Grossiste, Date\_Reception, Qte\_BL\_Gro, Conformite\_Gro, #id\_Liv, Date\_Dechargement, Qte\_BL\_Livreur, Conformite\_Liv)
- Concerner\_LG (\_#id\_BL\_LG\_, \_#id\_LPF\_, Qte\_EmbPF\_LPF)
- Emballage\_PF (\_id\_EmbPF\_, Num\_Emballage, Type, #id\_PF, Qte\_PF\_EmbPF, #id\_LPF)
- Grossiste (\_id\_Grossiste\_, Nom, Adresse, Email, Tel)
- Labo (\_id\_Labo\_, Nom, Adresse, Email, Tel)
- Livreur (\_id\_Liv\_, Nom, Adresse, Email, Tel)
- Lot\_PF (\_id\_LPF\_, Num\_Lot)
- PF (\_id\_PF\_, Nom, Type, Dosage)
- PF\_detail (\_id\_PFDet\_, Num\_série, Date\_Per, Date\_Fab, Prix, #id\_PF)

FIGURE 3.19 – Modèle logique de donnée laboratoire grossiste.

### c- Le modèles logiques de données grossiste pharmacie :

La figure suivante représente le modèle logique de données obtenu du grossiste pharmacie. Dans ce modèle, chaque table dispose d'une clé primaire unique permettant de distinguer ses enregistrements. On note également que certaines tables contiennent des clés étrangères qui renvoient à des clés primaires, ce qui assure le lien entre les tables (par exemple, la table BL.LG contient la clé étrangère #id.Liv qui pointe vers la clé primaire id.Liv de la table Livreur).

- BL\_GPh (\_id\_BL\_GPh\_, Num\_BL, #id\_Pharmacie, Date\_Reception, Qte\_BL\_Pharmacie, Conformite\_Ph, #id\_Grossiste, Date\_Chargement, Qte\_BL\_Grossiste, #id\_Liv, Date\_Dechargement, Qte\_BL\_Livreur, Conformite\_Liv)
- Concerner\_GPh (\_#id\_BL\_GPh\_, \_#id\_LPF\_, Qte\_LPF\_EmbPF)
- Emballage\_PF (\_id\_EmbPF\_, Num\_Emballage, #id\_PF, Qte\_PF\_EmbPF, #id\_LPF)
- Grossiste (\_id\_Grossiste\_, Nom, Adresse, Email, Tel)
- Livreur (\_id\_Liv\_, Nom, Adresse, Email, Tel)
- Lot\_PF (\_id\_LPF\_, Num\_Lot)
- PF (\_id\_PF\_, Nom, Type, Dosage)
- PF\_detail (\_id\_PFDet\_, Num\_série, Date\_Per, Date\_Fab, Prix, #id\_PF)
- Pharmacie (\_id\_Pharmacie\_, Nom, Adresse, Email, Tel)

FIGURE 3.20 – Modèle logique de donnée grossiste pharmacie.

**d- Le modèles logiques de données pharmacie client :**

- Client (`_id_Client_`, Num\_SS, Nom, Adresse, Email, Tel, Age)
- Facture (`_id_Facture_`, Num\_Fact, #id\_Client, #id\_pharmacie, Date\_Vente)
- PF (`_id_PF_`, Nom, Type, Dosage)
- PF\_detail (`_id_PFDet_`, Num\_serie, Date\_Per, Date\_Fab, Prix, #id\_Facture, Qte\_Vendu, #id\_PF)
- Pharmacie (`_id_pharmacie_`, Nom, Adresse, Email, Tel)

FIGURE 3.21 – Modèle logique de donnée pharmacie client.

La figure précédente représente le modèle logique de données obtenu du pharmacie client. Dans ce modèle, chaque table dispose d'une clé primaire unique permettant de distinguer ses enregistrements. On note également que certaines tables contiennent des clés étrangères qui renvoient à des clés primaires, ce qui assure le lien entre les tables (par exemple, la table Facture contient la clé étrangère #id\_pharmacie qui pointe vers la clé primaire id\_pharmacie de la table Pharmacie).

**e- Modèles logique de données identification :**

Dans ce dernier modèle, la table Compte possède une clé primaire id\_compte a fin de différencier entre les différents comptes des différents acteurs. Toute les autres tables possède une clé étrangère #id\_compte permettant de les relier à la table Compte. La figure suivante présente ce modèle.

- Client (`_id_Client_`, Num\_SS, Nom, Adresse, Email, Tel, Age, #id\_compte)
- compte (`_id_compte_`, User\_name, Pass, Email)
- Fournisseur (`_id_Fournisseur_`, Nom, Adresse, Email, Tel, Pays\_origine, #id\_compte)
- gouvernement (`_id_gouv_`, Nom, Adresse, Tel, Email, #id\_compte)
- Grossiste (`_id_Grossiste_`, Nom, Adresse, Email, Tel, #id\_compte)
- Labo (`_id_Labo_`, Nom, Adresse, Email, Tel, #id\_compte)
- Livreur (`_id_Liv_`, Nom, Adresse, Email, Tel, #id\_compte)
- Pharmacien (`_id_Pharmacien_`, Nom, Adresse, Email, Tel, #id\_compte)

FIGURE 3.22 – Modèle logique de données identification .

**3.2.3 Modélisation de l'interface de l'application**

Afin d'offrir une application simple à utiliser, garantissant une bonne visibilité et une accessibilité fluide, nous avons proposé le schéma modèle suivant, représentant l'application sous forme de pages et d'événements. Chaque page représente l'état en cours d'utilisation de l'application et chaque événement représente le choix ou l'action prise par les acteurs. Ce schéma modèle est fortement relié aux diagrammes de cas d'utilisation déjà proposés, puisqu'il met en action la notion d'acteur utilisateur de l'application ainsi que la notion de cas d'utilisation via les services offerts sur chaque page.

La figure suivante illustre ce schéma d'interface.

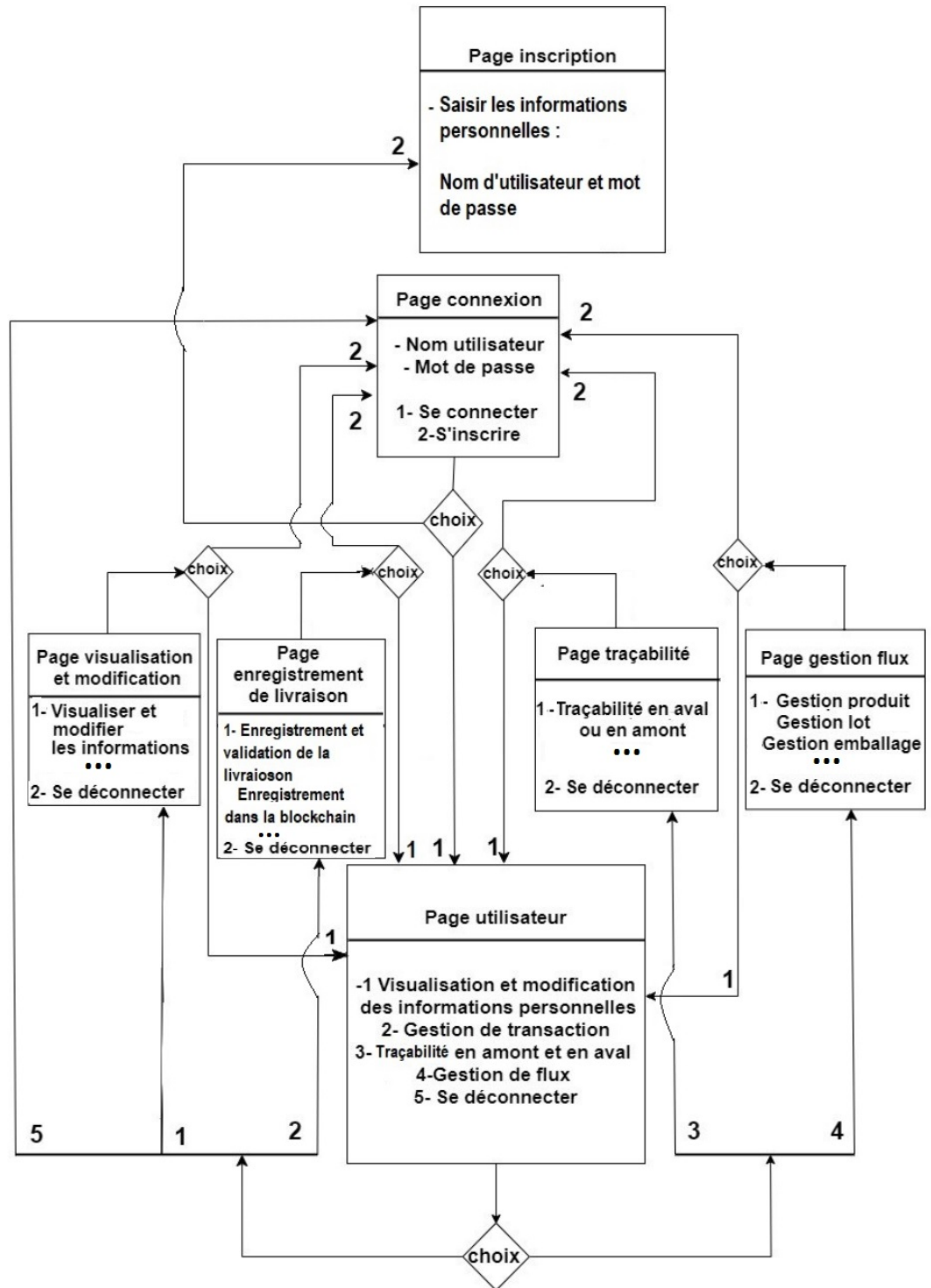


FIGURE 3.23 – Schématisation de l'interface.

L'utilisation de l'application débute par la page de connexion, offrant à l'utilisateur deux options :

- 1 - Se connecter à son espace de travail.
- 2 - S'inscrire pour créer un nouveau compte.

Le choix entre ces deux actions conduit l'utilisateur vers l'une des deux pages suivantes :

- 1 - Page utilisateur (en cas de connexion réussie).
- 2 - Page d'inscription (en cas de nouvelle inscription).

Ce principe de page et d'événement a été respecté dans l'ensemble du modèle proposé.

### 3.3 Modélisation générale du système de traçabilité blockchain

Dans cette section, nous présenterons en détail la modélisation de la chaîne de blocs de traçabilité en commençant par illustrer le schéma général de la Blockchain. Ensuite, nous présenterons le modèle proposé de cette chaîne de blocs en utilisant une modélisation basée sur le langage UML (Unified Modeling Language). Le modèle UML proposé comporte deux types de diagrammes : le diagramme de classes et le diagramme de séquence.

La figure suivante représente le schéma général du système de traçabilité basé sur la blockchain, illustrant une série de blocs identifiés par un numéro et possédant un hash (afin de garantir la sécurité et l'unicité de chaque bloc). Chacun de ces blocs possède le hash du bloc qui le précède (afin de garantir le chaînage entre les blocs). Les blocs contiennent deux informations importantes : l'horodatage (afin de créer un historique temporel des événements du bloc) et les transactions. Dans l'approche proposée, nous limitons les transactions aux requêtes de traçabilité (en amont ou en aval). Cette architecture permettra aux différents acteurs de bien tracer le cheminement des produits pharmaceutiques. Une dernière remarque importante concernant le chaînage des blocs est que le passage d'un bloc à un autre (création d'un nouveau bloc) se fait après saturation du bloc précédent (la taille maximale étant égale à 1 Mo, soit  $2^{20}$  octets).

Ce processus de chaînage des blocs suit la chaîne d'approvisionnement des produits pharmaceutiques, allant du fournisseur jusqu'au client, tout en renvoyant des données qui fournissent une traçabilité accrue tout au long du processus. Cela permet une gestion plus efficace des stocks et une validation précise des mouvements de produits pharmaceutiques dans la chaîne d'approvisionnement.



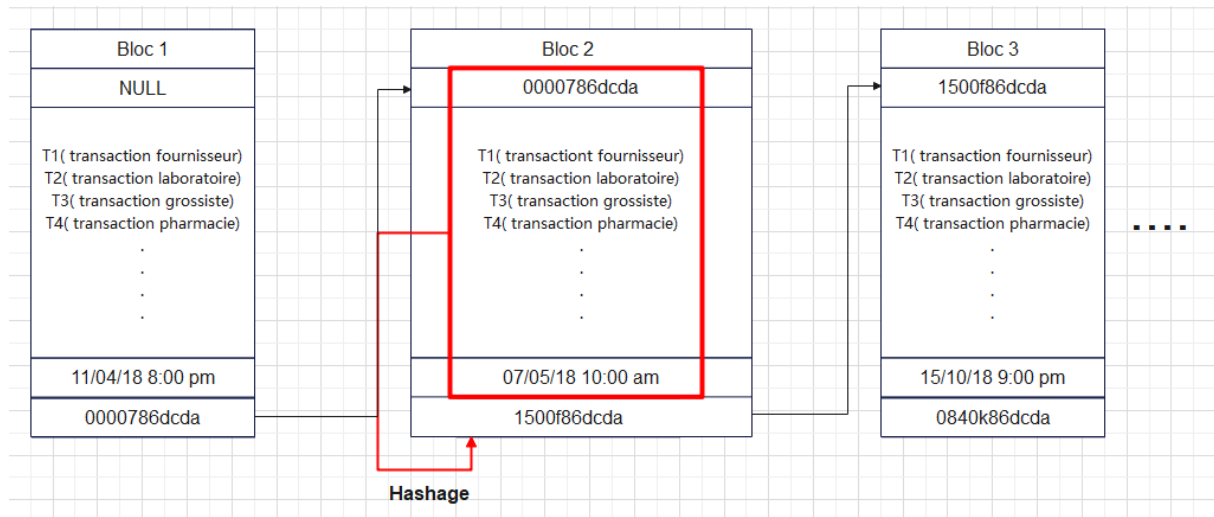


FIGURE 3.24 – Schéma général de la blockchain du système de traçabilité.

Après avoir présenté le schéma général de la Blockchain, nous allons décrire le modèle UML proposé pour une éventuelle implémentation. La modélisation UML repose sur le principe de voir le monde comme un ensemble d'objets ayant des caractéristiques (états) et pouvant exécuter des actions (méthodes). L'ensemble des objets ayant les mêmes états et les mêmes méthodes est regroupé dans une classe. Nous proposons en premier temps un diagramme de classe composé de trois classes :

- La classe bloc représente les blocs de la chaîne qui est caractérisée par les informations du bloc telles que son numéro, son hash, le hash précédent, sa taille, son horodatage et ses transactions. Elle possède différentes méthodes, notamment pour ajouter et obtenir des transactions, ainsi que pour vérifier la taille, etc.

- La classe transaction représente l'ensemble des transactions où chaque transaction est caractérisée par un numéro identifiant, son type (traçage fournisseur, traçage laboratoire, etc.), et le nombre de requêtes qui la composent. De même, elle contient des méthodes permettant l'ajout et l'obtention des requêtes qui la composent.

- La classe requête représente une requête minimale et possède la méthode de recherche d'informations ainsi que la méthode d'obtention du contenu de la requête.

La figure suivante illustre le diagramme de classe proposé.

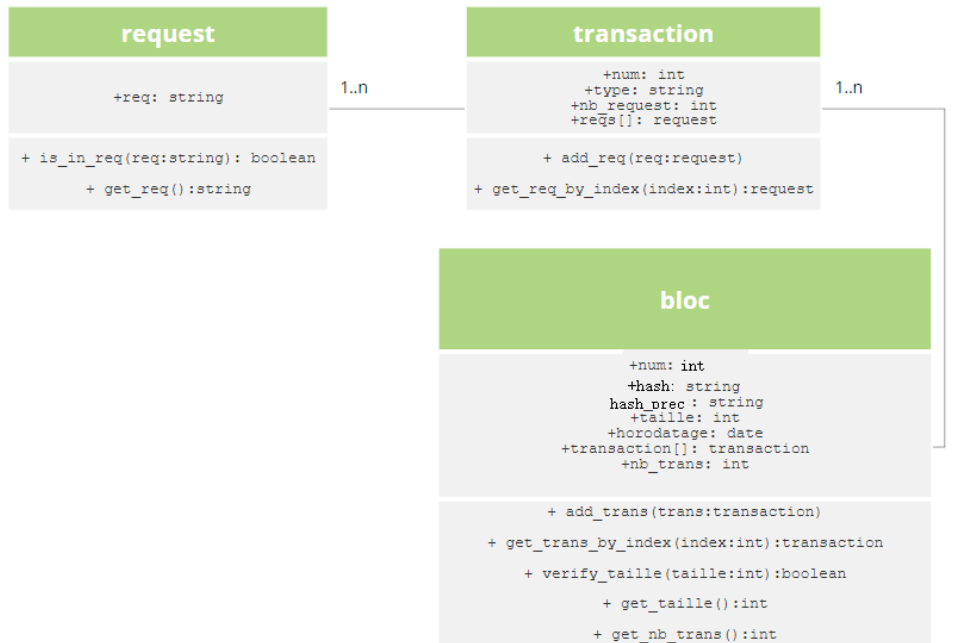


FIGURE 3.25 – Diagramme de classe de la blockchain.

La figure suivante représente le diagramme de séquence pour la création d'un nouveau bloc et l'ajout d'une nouvelle transaction. Cela nécessite d'abord la vérification de la possibilité d'ajouter une nouvelle transaction sans dépasser la taille maximale permise pour chaque bloc.

Le premier diagramme est lié au scénario de création d'un nouveau bloc, tandis que le deuxième est lié au scénario d'ajout de transactions à un bloc existant.

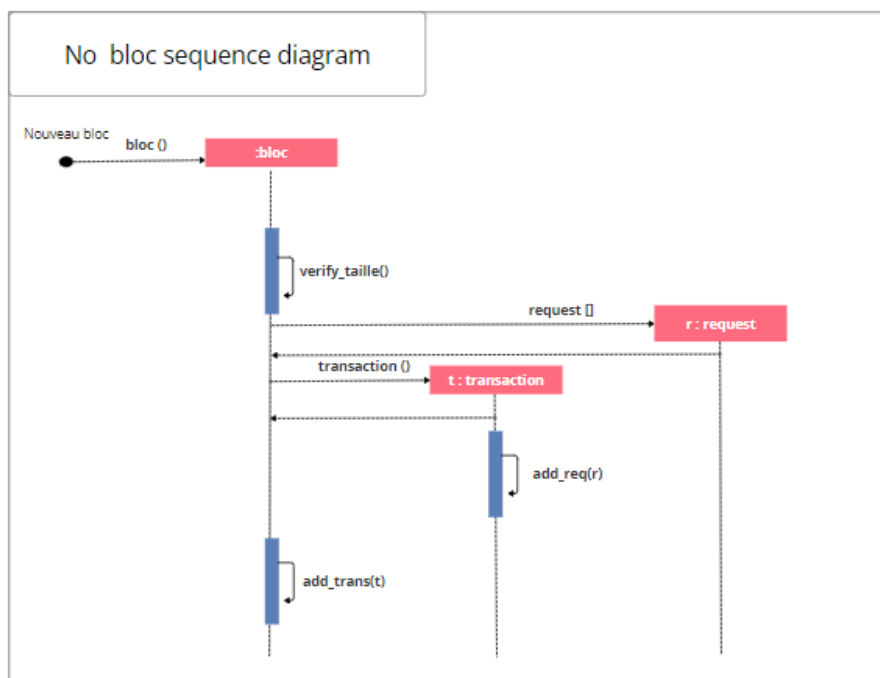


FIGURE 3.26 – Diagramme de séquence illustrant l'ajout d'un nouveau bloc.

De même, la figure suivante représente le deuxième diagramme de séquence dans lequel l'ajout de transactions créant un dépassement de capacité de bloc fait appel au scénario du premier diagramme de séquence déjà décrit.

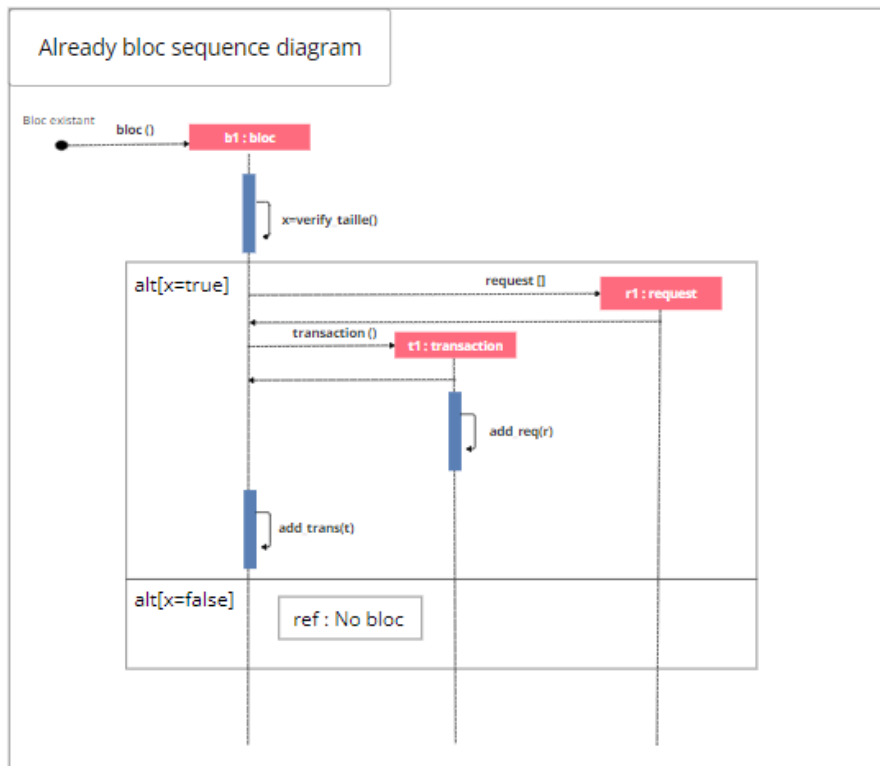


FIGURE 3.27 – Diagramme de séquence illustrant l'existence d'un bloc.

### 3.4 Réalisation et implémentation du système de traçabilité

Dans cette partie de notre travail, l'objectif est de concrétiser les modèles proposés sous forme d'une application client-serveur en utilisant les outils de programmation nécessaires et adéquats. Nous avons commencé cette implémentation en programmant la base de données à l'aide du système de gestion de base de données PhpMyAdmin et du langage de requête SQL. Ensuite, nous avons mis en œuvre le modèle blockchain en utilisant le langage PHP (Hypertext Preprocessor). Enfin, nous avons développé l'interface de notre application web en utilisant les langages de programmation web tels que HTML, JavaScript et CSS, ainsi que les services reliant l'interface à notre base de données via le serveur Apache (EasyPHP) et le langage de scripts généralisé PHP.

#### 3.4.1 Implémentation de la base de données

Dans cette partie du travail, il a été nécessaire de choisir soigneusement le langage de programmation pour la réalisation des tables obtenues après la modélisation logique. Pour cela, nous avons utilisé le langage SQL, qui est dédié à la programmation des bases de données. Pour faciliter le développement de la base, nous avons utilisé le serveur de gestion de base de données PhpMyAdmin, qui offre des options avancées telles que les

fonctions et les procédures stockées.

La création de la base de données vient après l'obtention des modèles logiques de données lors de l'étape de la conception. Avec PhpMyAdmin, la création des tables se fait via une interface graphique simple permettant la définition des clés primaires, des clés étrangères et des types d'attributs. Un exemple d'implémentation est celui de la table Compte, illustré dans la figure suivante :

#	Nom	Type	Interclassement	Attributs	Null	Valeur par défaut	Commentaires	Extra
<input type="checkbox"/>	1 <b>id_compte</b>	int(11)			Non	Aucun(e)		AUTO_INCREMENT
<input type="checkbox"/>	2 <b>User_name</b>	varchar(50)	latin1_swedish_ci		Non	Aucun(e)		
<input type="checkbox"/>	3 <b>Pass</b>	varchar(50)	latin1_swedish_ci		Non	Aucun(e)		
<input type="checkbox"/>	4 <b>Email</b>	varchar(100)	latin1_swedish_ci		Non	Aucun(e)		

FIGURE 3.28 – La table compte.

Dans les trois figures suivantes, nous présentons également l'implémentation des tables fournisseur, lot\_pf et bl\_fl.

#	Nom	Type	Interclassement	Attributs	Null	Valeur par défaut	Commentaires	Extra
<input type="checkbox"/>	1 <b>id_Fournisseur</b>	int(11)			Non	Aucun(e)		AUTO_INCREMENT
<input type="checkbox"/>	2 <b>Nom</b>	varchar(50)	latin1_swedish_ci		Non	Aucun(e)		
<input type="checkbox"/>	3 <b>Adresse</b>	varchar(100)	latin1_swedish_ci		Non	Aucun(e)		
<input type="checkbox"/>	4 <b>Email</b>	varchar(100)	latin1_swedish_ci		Non	Aucun(e)		
<input type="checkbox"/>	5 <b>Tel</b>	varchar(20)	latin1_swedish_ci		Non	Aucun(e)		
<input type="checkbox"/>	6 <b>Pays_origine</b>	varchar(30)	latin1_swedish_ci		Non	Aucun(e)		
<input type="checkbox"/>	7 <b>id_Cmp</b>	int(11)			Non	Aucun(e)		

FIGURE 3.29 – La table fournisseur.

#	Nom	Type	Interclassement	Attributs	Null	Valeur par défaut	Commentaires	Extra
<input type="checkbox"/>	1 <b>id_LPF</b>	int(11)			Non	Aucun(e)		AUTO_INCREMENT
<input type="checkbox"/>	2 <b>Num_Lot</b>	varchar(255)	latin1_swedish_ci		Non	Aucun(e)		

FIGURE 3.30 – La table lot\_pf.

#	Nom	Type	Interclassement	Attributs	Null	Valeur par défaut	Commentaires	Extra
<input type="checkbox"/>	1	id_BL_FL			Non	Aucun(e)		AUTO_INCREMENT
<input type="checkbox"/>	2	Num_BL			Non	Aucun(e)		
<input type="checkbox"/>	3	id_Labo			Oui	NULL		
<input type="checkbox"/>	4	Date_Reception			Oui	NULL		
<input type="checkbox"/>	5	Qte_BL_Labo			Oui	NULL		
<input type="checkbox"/>	6	Conformite_Labo			Oui	NULL		
<input type="checkbox"/>	7	id_Fournisseur			Non	Aucun(e)		
<input type="checkbox"/>	8	Date_Chargement			Non	Aucun(e)		
<input type="checkbox"/>	9	Qte_BL_Fourn			Non	Aucun(e)		
<input type="checkbox"/>	10	id_Liv			Oui	NULL		
<input type="checkbox"/>	11	Date_Dechargement			Oui	NULL		
<input type="checkbox"/>	12	Qte_BL_Livreur			Oui	NULL		
<input type="checkbox"/>	13	Conformite_Liv			Oui	NULL		

FIGURE 3.31 – La table bl.fl.

Après la création des tables, l'extraction des informations pertinentes peut se faire grâce aux fonctions et aux procédures stockées. Ces dernières contiennent un ensemble de requêtes formant une certaine tâche. Parmi les fonctions, on trouve la fonction Verifier\_compte permettant d'authentifier l'utilisateur et de retourner l'identifiant du compte en cas d'authentification réussie, et 0 en cas d'échec. La figure suivante illustre cette fonction.

<b>Nom de la procédure</b>	Verifier_compte			
<b>Type</b>	FUNCTION			
<b>Paramètres</b>	<b>Nom</b>	<b>Type</b>	<b>Taille/Valeurs*</b>	<b>Options</b>
	↓ Usernam	VARCH	50	Jeu de ↓  Supprimer
	↓ passworc	VARCH	20	Jeu de ↓  Supprimer
<b>Ajouter un paramètre</b>				
<b>Type de retour</b>	INT			
<b>Longueur/valeurs de retour</b>	11			
<b>Options de retour</b>				
<b>Définition</b>	<pre> 1 BEGIN 2 DECLARE res int ; 3 set res=0; 4 set res=(SELECT compte.id_Cmp 5           FROM compte 6           WHERE compte.Username=Username and compte.Password=Password); 7           IF ( res is null ) THEN 8             SET res=0; 9           END IF; 10          RETURN res; 11 12 END </pre>			

FIGURE 3.32 – Exemple d'une fonction nommée Verifier\_compte.

Une autre fonction est la fonction `bloc_vider` qui permet de retourner l'identifiant du dernier bloc ajouté et 0 dans le cas où la table `bloc` est vide.

The screenshot shows a form for defining a function. The 'Nom de la procédure' field contains 'bloc\_vider'. The 'Type' is set to 'FUNCTION'. The 'Type de retour' is 'INT' and the 'Longueur/valeur de retour' is '11'. The 'Options de retour' are empty. The 'Définition' field contains the following SQL code:

```

1 BEGIN
2
3 DECLARE np int;
4
5 SET np=(SELECT COUNT(*)
6         FROM bloc
7         );
8     RETURN np;
9
10 END
    
```

FIGURE 3.33 – Exemple d'une fonction nommée `bloc_vider`.

Une remarque importante à noter est que les fonctions permettent de retourner une seule valeur alors que les procédures stockées ne retournent pas de valeur.

Parmi les procédures stockées on trouve la procédure `ajouter_compte` qui permet d'insérer un nouveau compte.

The screenshot shows a form for defining a stored procedure. The 'Nom de la procédure' field contains 'ajouter\_compte'. The 'Type' is set to 'PROCEDURE'. The 'Paramètres' section lists four parameters:

Direction	Nom	Type	Taille/Valeurs*	Options
IN	Nom	V	50	Jeu d' ⓧ Supprimer
IN	Pass	V	20	Jeu d' ⓧ Supprimer
OUT	id_cc	IN		ⓧ Supprimer
IN	Emai	V	100	Jeu d' ⓧ Supprimer

The 'Définition' field contains the following SQL code:

```

1 BEGIN
2
3 INSERT INTO compte(compte.User_name,compte.Pass,compte.Email)
4 VALUES(Nom,Pass,Email);
5
6 SET id_compte=(SELECT compte.id_compte
7               FROM compte
8               WHERE compte.User_name=Nom AND compte.Pass=Pass AND
9               compte.Email=Email);
10 END
    
```

FIGURE 3.34 – Exemple d'une fonction nommée `ajouter_compte`.

Cette procédure possède trois paramètres en entrée (le nom d'utilisateur, le mot de passe et l'email). La procédure stockée offre une option avancée, qui est le paramètre de sortie id\_compte, dont la valeur sera l'identifiant du compte déjà ajouté.

Une autre procédure stockée nommée Modifier\_client\_tout dans la base de données. Cette procédure est conçue pour mettre à jour les informations d'un client existant dans la table client. Elle accepte plusieurs paramètres d'entrée : Nom, Adresse, Email, Tel, Num\_SS, Age, et id\_Client. Son rôle est de mettre à jour les informations du client avec les valeurs des paramètres fournis. La mise à jour s'effectue en utilisant l'identifiant unique du client (id\_Client) pour identifier la ligne à modifier.

<b>Nom de la procédure</b>	Modifier_client_tout				
<b>Type</b>	PROCEDURE				
<b>Paramètres</b>	<b>Direction</b>	<b>Nom</b>	<b>Type</b>	<b>Taille/Valeurs*</b>	<b>Options</b>
	‡ IN	Nom	IN	50	Supprimer
	‡ IN	Adres	IN	100	Supprimer
	‡ IN	Email	IN	100	Supprimer
	‡ IN	Tel	IN	20	Supprimer
	‡ IN	Num_	VA	255	Jeu d Supprimer
	‡ IN	Age	IN		Supprimer
	‡ IN	id_Cli	IN		Supprimer
<b>Définition</b>	<b>Ajouter un paramètre</b>				
	<pre> 1 BEGIN 2     UPDATE client 3     SET Nom = Nom, 4       Adresse = Adresse, 5       Tel = Tel, 6       Email = Email, 7       Num_SS = Num_SS, 8       Age = Age 9     WHERE id_Client = id_client; 10 END </pre>				

FIGURE 3.35 – Exemple d'une procédure stockée nommée Modifier\_client\_tout.

Dans la figure qui suit on présente la procédure stockée nommée Recherche\_livreur\_tout. Cette procédure est conçue pour récupérer toutes les informations des livreurs existants dans la table Livreur. Elle ne prend aucun paramètre d'entrée. Son rôle est de sélectionner et de renvoyer toutes les lignes de la table Livreur, fournissant ainsi un ensemble complet de données sur les livreurs.

<b>Nom de la procédure</b>	Recherche_livreur_tout				
<b>Type</b>	PROCEDURE				
<b>Paramètres</b>	<b>Direction</b>	<b>Nom</b>	<b>Type</b>	<b>Taille/Valeurs*</b>	<b>Options</b>
<b>Ajouter un paramètre</b>					
<b>Définition</b>	<pre> 1 BEGIN 2 select * FROM Livreur; 3 END         </pre>				

FIGURE 3.36 – Exemple d’une procédure stockée nommée Recherche\_livreur\_tout.

La figure suivante présente une autre procédure stockée nommée Ajouter\_fournisseur dans notre base de données.

<b>Nom de la procédure</b>	Ajouter_fournisseur				
<b>Type</b>	PROCEDURE				
<b>Paramètres</b>	<b>Direction</b>	<b>Nom</b>	<b>Type</b>	<b>Taille/Valeurs*</b>	<b>Options</b>
	‡ IN	Nom	VA	50	Jeu d <input type="button" value="Supprimer"/>
	‡ IN	Adres	VA	100	Jeu d <input type="button" value="Supprimer"/>
	‡ IN	Email	VA	100	Jeu d <input type="button" value="Supprimer"/>
	‡ IN	Tel	VA	20	Jeu d <input type="button" value="Supprimer"/>
	‡ IN	Pays_	VA	30	Jeu d <input type="button" value="Supprimer"/>
	‡ OUT	id_foi	IN		<input type="button" value="Supprimer"/>
	‡ IN	id_Cn	IN		<input type="button" value="Supprimer"/>
<b>Ajouter un paramètre</b>					
<b>Définition</b>	<pre> 1 BEGIN 2 INSERT INTO   fournisseur(fournisseur.Nom,fournisseur.Adresse,fournisseur.Email,fournis   seur.Tel,fournisseur.Pays_origine,fournisseur.id_Cmp) 3 VALUES(Nom,Adresse,Email,Tel,Pays_origine,id_Cmp); 4 SET id_fournisseur=(SELECT fournisseur.id_Fournisseur 5                       FROM fournisseur 6                       WHERE fournisseur.Nom=Nom ); 7 END         </pre>				

FIGURE 3.37 – Exemple d’une procédure stockée nommée Ajouter\_fournisseur.

Cette procédure est conçue pour insérer un nouveau fournisseur dans la table fournisseur. Elle prend plusieurs paramètres d’entrée : Nom, Adresse, Email, Tel, Pays\_origine, id\_Cmp et un paramètre de sortie id\_fournisseur. Le rôle de la procédure est d’insérer un nouveau fournisseur dans la table fournisseur avec les valeurs des paramètres fournis. Ensuite, elle récupère l’identifiant du fournisseur inséré en utilisant son nom et l’assigne au paramètre de sortie id\_fournisseur.

La procédure tout\_lot\_mp dans la figure suivante est conçue pour retourner tous les lots de matière première avec leurs détails sans nécessiter de paramètres d’entrée. Lors de



son exécution, cette procédure récupère et renvoie une liste complète de tous les lots de matière première disponibles. Les informations retournées pour chaque lot comprennent l'identifiant unique du lot, appelé id\_LPF, et le numéro du lot, Num\_Lot.



FIGURE 3.38 – Exemple d'une procédure stockée nommée tout\_lotmp.

La procédure Nouveau\_BL\_FL dans la figure suivante est conçue pour créer un nouveau bon de livraison (BL) par le fournisseur qui va remplir les données spécifique a lui. Lors de son exécution, elle enregistre les détails complets de la premiere partie de la livraison, y compris les informations suivantes comme paramètres d'entrée : Num\_BL (numéro du BL), id\_Labo , id\_livreur, id\_fournisseur , Date\_Chargement (date de chargement par le fournisseur), Qte\_BL\_Fournisseur(quantité chargée par le fournisseur) .Cette procédure permet de stocker l'identifiant du bon livraison.

Cette procédure assure la saisie et le suivi précis des informations de livraison pour chaque bon de livraison créé.

<b>Nom de la procédure</b>	Nouveau_BL_FL										
<b>Type</b>	PROCEDURE										
<b>Paramètres</b>	<b>Direction</b>	IN	<b>Nom</b>	id_f	<b>Type</b>	IN	<b>Taille/Valeurs*</b>		<b>Options</b>		Supprimer
		IN	Date_	D/		---					Supprimer
		IN	Qte		IN						Supprimer
		IN	Num_		IN						Supprimer
		IN	id_La		IN						Supprimer
		IN	id_Liv		IN						Supprimer
		OUT	id_BL		IN						Supprimer
<b>Définition</b>	<b>Ajouter un paramètre</b>										
	<pre> 1 BEGIN 2 INSERT INTO bl_fl   (bl_fl.Num_BL,bl_fl.Date_Chargement,bl_fl.Qte_BL_Fourn,bl_fl.id_Fournisseur,bl_fl.id_Labo,bl_fl.id_Liv) 3 VALUES (Num_BL,Date_Chargement,Qte,id_f,id_Labo,id_Liv); 4 SET id_BL_FL =(SELECT bl_fl.id_BL_FL 5                 FROM bl_fl 6                 WHERE bl_fl.Num_BL=Num_BL ); 7 END </pre>										

FIGURE 3.39 – Exemple d’une procédure stockée nommée Nouveau.BL\_FL.

La procédure `modifier_bl_fl_liv` illustrée dans la figure suivante va continuer le remplissage du bon de livraison (déjà créé par le fournisseur) par le livreur. Le livreur saisit les données telles que `idblfl` (l’identifiant du bon de livraison déjà créé par le fournisseur), `qte` (quantité déchargée), `dated` (date de déchargement) et `Conformite_liv` (la conformité de la livraison par rapport à celle du fournisseur).

<b>Nom de la procédure</b>	modifier_bl_fl_liv										
<b>Type</b>	PROCEDURE										
<b>Paramètres</b>	<b>Direction</b>	IN	<b>Nom</b>	idblfl	<b>Type</b>	IN	<b>Taille/Valeurs*</b>		<b>Options</b>		Supprimer
		IN	qte		IN						Supprimer
		IN	date	D.		---					Supprimer
		IN	Confi	V.		50			Jeu d		Supprimer
<b>Définition</b>	<b>Ajouter un paramètre</b>										
	<pre> 1 BEGIN 2 UPDATE bl_fl 3 SET bl_fl.Qte_BL_livreur = qte, bl_fl.Date_Dechargement=dated, 4   bl_fl.Conformite_Liv=Conformite_liv 5 WHERE bl_fl.id_bl_fl = idblfl; 6 7 END </pre>										

FIGURE 3.40 – Exemple d’une procédure stockée nommée `modifier_bl_fl_liv`.

La procédure stockée "recherche\_livreur\_id" est conçue pour rechercher un livreur spécifique dans une base de données en utilisant son identifiant. Elle prend en entrée un paramètre id de type entier (INT), représentant l'identifiant unique du livreur à rechercher. La procédure récupère ensuite toutes les informations du livreur correspondant à cet identifiant.

Ainsi, en fournissant simplement l'identifiant du livreur, cette procédure permet d'extraire rapidement et facilement les détails complets du livreur spécifique, simplifiant ainsi la gestion et l'accès aux données des livreurs dans la base de données.

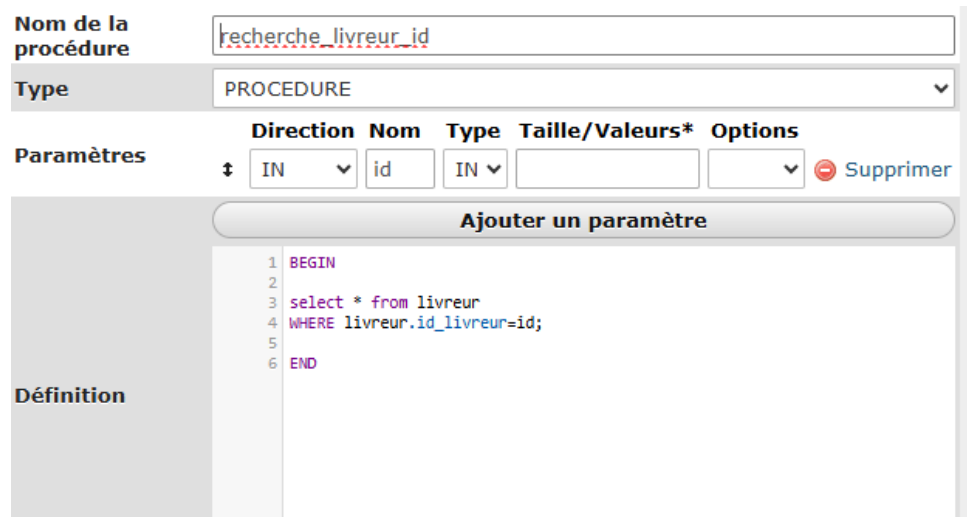


FIGURE 3.41 – Exemple d'une procédure stockée nommée recherche\_livreur\_id.

### 3.4.2 Implémentation de la Blockchain

L'implémentation de la Blockchain revient à l'implémentation des classes : Bloc, Transaction et Requête, ainsi qu'à l'implémentation des scénarios des diagrammes de séquence déjà modélisés dans la partie de modélisation.

La programmation des classes nécessite un langage de programmation orienté objet. Pour cela, nous avons utilisé le langage de programmation PHP. Nous donnons un exemple de code d'implémentation de la classe bloc :

```

1     class bloc {
2     public $num ; // le numero du bloc
3     public $hash ; // le hash du bloc
4     public $hash prec ; // le hash du bloc precedent
5     public $taille ; // La taille disponible dans le bloc
6     public $horodatage ; // la date d ajout du bloc
7     public $transactions = array() ; // un tableau des transactions du bloc
8     public $nb trans ; // le nombre de transaction de bloc
9
10    // Constructeur permettant l initialisation de l objet bloc :
11    function construct($num,$hash, $hash prec, $taille, $horodatage) {
12    $this->num = $num ;
13    $this->hash = $hash ;
14    $this->hash prec = $hash prec ;
15    $this->taille = $taille ;
16    $this->horodatage = $horodatage ;
17    $this->nb trans = 0 ; }
18
    
```

```

19 // Ajouter une nouvelle transaction dans le tableau de transations du bloc :
20 fonction add trans($trans) {
21 $this->transactions[$this->nb trans] = $trans ;
22 $this->nb trans = $this->nb trans + 1 ; }
23
24 // Obtenir une transaction a partir de son numero :
25 fonction get trans by index($index) {
26 return $this->transactions[$index] ;}
27
28 // Diminuer la taille du bloc et retourner vrai si on peut ajouter une nouvelle transac-
29 tion, sinon retourner faux :
30 fonction verify taille($taille transaction) {
31 if( $this->taille - $taille transaction > 0 ) { $this->taille = $this->taille
32 - $taille transaction ; return true ; }
33 else { return false ; }
34 }
35 // ....

```

L'implémentation des diagrammes de séquence repose sur l'état de la table bloc dans la base de données. Cette table peut être soit vide (la première utilisation de la blockchain), soit déjà remplie (il y a au moins un bloc qui a été déjà créé).

- Dans le premier cas, notre programme va créer un objet Bloc avec un numéro (le premier numéro de bloc donné), un hash (en utilisant des algorithmes de hachage), un horodatage (le temps actuel de création du bloc), la taille (égale à 1 Mo) et le hash du bloc précédent (égal à null puisqu'il n'y a pas de bloc précédent). Après la création de l'objet, le programme crée et ajoute la nouvelle transaction au bloc. La transaction contient les requêtes de traçabilité basées sur le numéro de bon de livraison, le numéro de lot et la date de livraison. Enfin, le numéro de bloc et son hash sont ajoutés à la table bloc.

```

1 // Creation de bloc :
2 if ( $bloc vide == 0 ) { // la table bloc est vide
3 $horodatage = date( m /d/Y h :i :s a , time() ) ;
4 $x= $bloc vide +1 ;
5 $num =
6 $hash =
7 $hash prec = NULL ;
8 $taille = pow(2,20) ;
9 $obj bloc = new bloc($x,$hash,$hash prec,$taille,$horodatage) ;
10 // L ajout d une nouvelle transaction :
11 $req1 = SELECT bl fl.Num BL AS numblfl, fournisseur.Nom AS nomf, .....
12 $obj req1= new request ($req1) ;
13 ...
14 $obj trans = new transaction ($numtr,$stypetr) ; $obj trans->add req($obj req1) ;
15 ...
16 $obj bloc->add trans($obj trans) ;
17 ...
18 $sql 3 = CALL ajouter bloc( $h , @result) ;
19 $result 3 = mysqli query($db, $sql 3) ;

```

- Dans le deuxième cas, le programme va calculer la taille de la nouvelle transaction à ajouter et invoquer la fonction qui vérifie la possibilité d'ajouter cette nouvelle transaction. S'il n'est pas possible d'ajouter la transaction, le programme va réutiliser le même code que dans le cas précédent. Dans le cas contraire, le programme ne va pas ajouter un nouveau bloc. Cependant, il va ajouter la nouvelle transaction dans le dernier bloc de la chaîne.

```
1 $newtaille = strlen(serialize($obj trans)) ;
2 if ($obj bloc->verify taille($newtaille) == false)
3
4 ... // le meme code du cas precedent
5 else { // Ajouter la transaction dans le bloc en cours :
6 $obj trans = new transaction ($numtr,$stypetr) ;
7 $obj trans->addreq($obj req1);
8 $obj bloc->add trans($obj trans);
9 $objData2 = serialize( $obj bloc);
10 $fp = fopen($filePath, "w");
11 fwrite($fp, $objData2);
12 fclose($fp); }
```

Dans les deux cas précédents, le programme fait appel à des fonctions prédéfinies telles que :

- serialize : Cette fonction convertit une variable (tableau, objet, etc.) en une chaîne de caractères représentant sa structure et ses valeurs. Cette chaîne peut être stockée ou transmise et désérialisée ultérieurement pour retrouver la variable d'origine, on peut utiliser la fonction unserialize.
- fopen : La fonction fopen en PHP ouvre un fichier ou une URL pour lecture, écriture ou les deux. Elle renvoie un pointeur de fichier à utiliser avec d'autres fonctions de manipulation de fichiers comme fread, fwrite, et fclose.
- fwrite : Est une fonction en PHP qui permet d'écrire du contenu dans un fichier ouvert. Elle prend en entrée un pointeur de fichier obtenu via fopen et une chaîne de caractères à écrire.
- file\_get\_contents : Est une fonction en PHP qui permet de lire le contenu d'un fichier dans une chaîne. Elle prend en argument le chemin du fichier à lire et retourne son contenu sous forme de texte.
- glob : Est une fonction en PHP qui permet de rechercher des fichiers ou des répertoires en utilisant des motifs de recherche basés sur des caractères génériques dans un répertoire spécifié. Elle retourne un tableau contenant les chemins des fichiers ou des répertoires correspondants.

### 3.4.3 Implémentation de l'interface

Les langages de programmation utilisés dans la réalisation de l'interface sont des langages dédiés à la programmation web ; à savoir, les langages :

HTML (HyperText Markup Language : est le langage de balisage standard utilisé pour créer et structurer le contenu des pages web, CSS (Cascading Style Sheets : est un langage de feuilles de style utilisé pour définir l'apparence et la mise en page des éléments HTML d'une page web et JavaScript (est un langage de programmation de script utilisé principalement pour rendre les pages web interactives et dynamiques) tout en se basant sur le schéma général du système de traçabilité déjà proposé. La liaison entre l'interface (côté client) et la base de données (côté serveur) est faite grâce au langage de programmation PHP.

Dans ce qui suit, nous présentons quelques figures de l'interface de notre application web.



FIGURE 3.42 – La page d'enregistrement et de connexion.

Dans la figure précédente, l'utilisateur (fournisseur, laboratoire, livreur, etc.) peut s'enregistrer s'il ne possède pas de compte ou se connecter à son espace de travail après avoir été enregistré avec un nom d'utilisateur et un mot de passe. Cette connexion nécessite une liaison à la base de données et la vérification du nom d'utilisateur et du mot de passe. Pour cela, nous faisons appel au langage PHP pour assurer la connexion à la base de données via le code suivant :

```

1
2 <?php // apres l'exécution de ce code, la variable $db contiendra une connexion active a
   la base de données b_trac sur le serveur MySQL local, utilisant le nom d'utilisateur
   root et sans mot de passe\\
3
4 define( 'DB.SERVER', 'localhost:3306' );
5
6 define( 'DB.USERNAME', 'root' );
7
8 define( 'DB.PASSWORD', '-----' );
9
10 define( 'DB.DATABASE', 'b_trac' );
11
12 \ $db = mysqli_connect
13 (DB.SERVER,DB.USERNAME,DB.PASSWORD,DB.DATABASE);\\
14 ?>

```

De même, le code suivant permet de vérifier le nom d'utilisateur et le mot de passe en faisant appel à la fonction `Verifier_compte`, déjà présentée dans la partie de l'implémentation de la base de données, tout en sécurisant l'accès par l'utilisation des sessions :

```

1 <?php\\
2 include("config.php"); // Se connecter a la base
3 session_start(); // Ouvrir une nouvelle session
4 ....
5 $myusername = mysqli_real_escape_string($db,$POST['user']); // Obtenir le nom d'
   utilisateur introduit
6 $mypassword = mysqli_real_escape_string($db,$POST['pswd']); // Obtenir le mot de
   passe introduit
7
8 // Execution de la requete SQL pour verifier l'existence du compte avec le nom d'
   utilisateur et le mot de passe fournis
9 $sql = "SELECT verifier_Compte('$myusername', '$mypassword')";
10 $result = mysqli_query($db, $sql);
11 .....
12 $_SESSION['login_user'] = $myusername; // Enregistrer la session utilisateur
13
14

```

Après avoir être connecter à son espace, l'utilisateur peut voir ces informations personnelles et il a la possibilité de les modifier(voir la figure suivante dans le cas d'un espace de travail pour un grossiste) .

FIGURE 3.43 – L’interface de visualisation et de modification des informations personnelles du grossiste.

Le code de visualisation et de modification d’informations personnelles du grossiste est :

```

1 <?php
2
3 include("config.php");
4 $id = $_GET['id']; // obtenir l'identifiant du grossiste
5 $sql_grossiste = "CALL recherche_grossiste_id('$id')";
6 // renvoie les informations personnelles du grossiste a partir de son identifiant
7
8 $result_grossiste = mysqli_query($db, $sql_grossiste);
9
10 // ...
11
12 $Nom = $_POST['name']; // Obtenir le nom de grossiste
13 $Adresse = $_POST['addr']; // Obtenir l'adresse de grossiste
14 $Email = $_POST['email']; // Obtenir l'email de grossiste
15 $Tel = $_POST['tel']; // Obtenir le telephone de grossiste
16
17 $sql_grossiste = "CALL modifier_grossiste_tout('$id', '$Nom', '$Adresse', '$Email',
18 '$Tel')";
19 // Modifier les informations personnelles de grossiste
20 $result_grossiste = mysqli_query($db, $sql_grossiste);
21
22
23 ?>

```

La figure suivante présente la phase de gestion des emballages par le laboratoire. Dans cette phase, le laboratoire doit fournir les informations nécessaires pour enregistrer les emballages (qui seront livrés plus tard). Parmi ces informations : le nombre d'emballages, le lot de produits finis contenant ces emballages, le produit fini, le numéro, le type et la quantité (le nombre de produits finis contenus dans l'emballage) de chaque emballage.

Enregistrement des emballages :

Nombre des emballages livrés :

Lot PF :

Produit fini :

Les informations des emballages livrés :

Numéro d'emballage	Type emballage	Quantité	Action
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	Supprimer

Ajouter

Enregistrer Quitter

FIGURE 3.44 – L’interface de gestion des emballages par le laboratoire.



Cette opération fait appel au code PHP suivant :

```

1 <?php
2
3 $nb = $_POST['globs']; // Obtenir le nombre d'emballage.
4 $idlot = $_POST['lot_pf']; // Obtenir le id lot.
5 $idpf = $_POST['pfs']; // Obtenir le id de produit fini.
6 ...
7 for ($i = 0; $i < $nb; $i++) { // pour chaque emballage
8     $qtepf = $_POST['quantite_' . $i]; // Obtenir la quantite de produit fini
9     $numemb = $_POST['num_emb_' . $i]; // Obtenir le numero d'emballage.
10    $typepf = $_POST['nom_emb_' . $i]; // Obtenir le type de produit fini
11
12    ...
13    $sql_nbl = "CALL ajouter_emb_pf('$numemb','$idlot', '$qtepf','$typepf','$idpf',
14    @result)"; // enregistrer l'emballage
15    $result_nbl = mysqli_query($db, $sql_nbl);
16 }
17 ...
18 ?>

```

La figure suivante représente la procédure de gestion de livraison par un livreur. Ce dernier doit confirmer le bon de livraison du fournisseur vers le laboratoire en validant la date de déchargement de la matière première, la quantité déchargée, et il peut ajouter une réclamation s'il y a une différence dans les détails de la livraison.

**Gestion BL :**

Veuillez choisir un BL :

Num\_BL: FL\_10, Fournisseur: Unipex, Labo: Sophal, Date Chargement: 2024-06-29, Quantité Chargé: 123

Date de déchargement :

jj/mm/aaaa

Quantité déchargé :

Réclamation :

Valider

127.0.0.1/edsa-TRPH/index.php?id=1

FIGURE 3.45 – L’interface de gestion de livraison par le livreur vers le laboratoire.

Le code suivant est utilisé pour réaliser cette gestion dans la base de données.

```

1 ...
2 $conformite_liv = $_POST['Conformite.Liv']; // obtenir les details de reclamation
3 $date_dechargement = $_POST['Date_Dechargement']; //obtebir la date de dechargement de
4   matiere premiere
5 $qte_bl_livreur = $_POST['Qte.BL.Livreur']; // obtenir la quantite decharge
6 $bl_fl_id = $_POST['bl_fl']; // obtenir le id du bon de la livraison fournisseur
7   laboratoire
8
9 $sql_update = "CALL modifier_bl_fl_liv('$bl_fl_id','$qte_bl_livreur','$date_dechargement
10  ','$conformite_liv') "; // enregistrer les information de la livraison validees par
   le livreur
11
12 $result_update = mysqli_query($db, $sql_update);
13 ...

```

**Traçabilité des Bons de Livraison**

Mode de Recherche :

Numéro de Bon de Livraison

Numéro de Bon de Livraison :

Rechercher

**Résultats de la recherche :**

Numéro de bon de livraison : FL\_10

Le fournisseur :

Nom	Adresse	Email	Numéro de téléphone	Pays origine
Unipex	92800 Puteaux, France	unipex@gmail.com	+33147328130	France

Le livreur :

Nom	Adresse	Email	Numéro de téléphone
Numilog	Zone industrielle, Bouira	numilog@gmail.com	0770 30 93 17

Le laboratoire :

Nom	Adresse	Email	Numéro de téléphone
Sophal	BP 147, Hassi Ben Okba, Oran 31295	sophal_labo@gmail.com	041 76 55 11

La matière première :

Nom	Type	Dosage
Hypromellose	Liant	10-20mg

Les 1 lots livrés :

Numero de lot	Quantité d'emballage
1001	123

Les informations de bon de livraison :

Date chargement (fournisseur)	Quantité chargé (fournisseur)	Date déchargement(livreur)	Quantité déchargé (livreur)	Conformité livreur	Date réception (labo)	Quantité reçue (labo)	Conformité labo
2024-06-29	123	2024-07-01	123	Bonne	2024-07-03	123	Bo

Quitter

FIGURE 3.46 – L’interface de traçabilité de livraison par le fournisseur.

La figure précédente représente l’objectif visé par l’application, qui est la traçabilité. Le fournisseur doit fournir la clé de recherche (le numéro de bon de livraison, le numéro de lot, la date de chargement, etc.) pour que l’application lui renvoie les informations de traçabilité; à savoir : le numéro de bon de livraison, le fournisseur, le livreur, le labora-

toire, la matière première livrée, les lots livrés, les informations de la livraison (les dates de livraison, les réclamations et les quantités livrées).

On donne le code PHP suivant correspondant à la traçabilité de la livraison de matière première par le fournisseur vers le laboratoire :

```

1  <?php
2  include("config.php");// Se connecter a la base de donnees
3  include("blocs.php");// Importer les classes de la blockchain
4
5  if ($mode_recherche == 'num_bl' ) { //dans le cas ou la cle de recherche est le numero de
6      bon de livraison
7          $num_bl = $_POST['num_bl']; // Obtenir le numero de bon de livraison
8          ...
9          if ($type_l== 'FL') { // Dans le cas d'une livraison fournisseur laboratoire
10             .....
11
12             $files = glob('*.bl');
13             foreach($files as $file) { // parcourir tout les blocs de la chaine
14                 ...
15                 $objData = file_get_contents($file); //ouvrir le fichier bloc
16                 .....
17                 $tempreq=$trans->get_req_by_index($j); // pour chaque transaction contenue
18                 dans le bloc
19                 if($tempreq->is_in_req($num_bl)) // verifier la presence du numero de
20                 bon de la livraison dans chaque transaction {$sql_bl =$tempreq->get_req(); $lambda =1;
21                 }
22             .....
23                 if($lambda==1){ // presence du numero de bon de livraison
24                     $stmt = $db->prepare($sql_bl);
25                     // $stmt->bind_param("s", $num_bl);
26                     $stmt->execute(); // executer la requete qui renvoie les informations voulue a
27                     base du numero de bon de livraison
28                     $result = $stmt->get_result();
29                     ...
30                 }
31             }
32         }
33     }

```

### 3.5 Conclusion

Dans ce chapitre on a présenté les différentes étapes qui ont menés à la réalisation de l'application finale en utilisant les outils de modélisation et de programmation nécessaires. Les étapes parcourues sont : la conception du système de traçabilité et de la base de données, la modélisation de la blockchain et l'implémentation de l'application.

## Conclusion générale

Dans ce projet de recherche, nous avons étudié l'application de la technologie blockchain pour améliorer la traçabilité des médicaments dans la chaîne d'approvisionnement pharmaceutique. Cette technologie offre une solution innovante visant à garantir l'authenticité des produits pharmaceutiques et à réduire les risques de contrefaçon, contribuant ainsi à une gestion plus efficace des médicaments et assurant la sécurité et la qualité des produits pour les patients.

En intégrant la blockchain, nous avons démontré que chaque étape de la chaîne d'approvisionnement peut être surveillée de manière transparente et sécurisée grâce à l'enregistrement de tous les détails de livraison de produits pharmaceutiques en utilisant des objets de programmation assurant la protection de ces informations. Cela permet de suivre le parcours des médicaments depuis leur production jusqu'à leur distribution, réduisant les erreurs et améliorant la confiance des consommateurs et des régulateurs dans le système.

Les résultats obtenus montrent que l'adoption de la blockchain dans le secteur pharmaceutique pourrait transformer la manière dont les médicaments sont gérés et distribués. Cette technologie prometteuse peut être étendue à d'autres domaines nécessitant une traçabilité rigoureuse et une sécurité renforcée des données.

Le choix des outils de modélisation et de programmation est crucial pour garantir le succès de l'application web, notamment dans un contexte où la demande croissante pour des services rapides et en ligne est observée.

Comme perspectives futures, nous envisageons d'améliorer la qualité des services offerts, la sécurité et la capacité de l'application. Une autre perspective est l'extension de l'utilisation de l'application pour la gestion de la chaîne d'approvisionnement, incluant la gestion des stocks, du transport et de la production. Enfin, nous prévoyons d'améliorer l'architecture de la blockchain en termes de qualité et de sécurité.

# Bibliographie

- [1] Shubhani AGGARWAL et Neeraj KUMAR. “Architecture of blockchain”. In : *Advances in Computers*. T. 121. Elsevier, 2021, p. 171-192.
- [2] Shubhani AGGARWAL et Neeraj KUMAR. “Basics of blockchain”. In : *Advances in computers*. T. 121. Elsevier, 2021, p. 129-146.
- [3] Amrou AWAYSHEH et Robert D KLASSEN. “The impact of supply chain structure on the use of supplier socially responsible practices”. In : *International Journal of Operations & Production Management* 30.12 (2010), p. 1246-1268.
- [4] Mimouna CHEKIFI, Belkacem BENADDA et Mohammed BENAÏSSA. “Importance of the Blockchain technology into the Agro-Food industries”. In : ().
- [5] Massimo DI PIERRO. “What is the blockchain?”. In : *Computing in Science & Engineering* 19.5 (2017), p. 92-95.
- [6] Nathalie FABBE-COSTES et Christelle LEMAIRE. “La traçabilité totale d’une Supply Chain : principes, obstacles et perspectives de mise en oeuvre”. In : *Revue française de gestion industrielle* 20.3 (2001), pp-23.
- [7] Kristoffer FRANCISCO et David SWANSON. “The supply chain has no clothes : Technology adoption of blockchain for supply chain transparency”. In : *Logistics* 2.1 (2018), p. 2.
- [8] Justine HAOND. “La lutte contre la contrefaçon : protection industrielle et sécurisation par le data matrix”. Thèse de doct. Université de Lorraine, 2012.
- [9] Taher HASSAN. “Logistique hospitalière : organisation de la chaîne logistique pharmaceutique aval et optimisation des flux de consommables et des matériels à usage unique”. Thèse de doct. INSA de Lyon, 2006.
- [10] Heng HOU. “The application of blockchain technology in E-government in China”. In : *2017 26th International Conference on Computer Communication and Networks (ICCCN)*. IEEE, 2017, p. 1-4.
- [11] IEF IMANE, Abdennebi TALBI et Fouad JAWAB. “Chaine logistique hospitalière : définition, état de l’art et pistes d’amélioration”. In : *CIGIMS 2012* (2012).
- [12] HOUIOUA ISMAIL. “Utilisation de Blockchain pour la sécurisation des données ERPs”. In : ().
- [13] *La lutte contre les médicaments contrefaits : Et si la solution était en la blockchain ?* URL : <https://www.socialnetlink.org/2021/05/05/la-lutte-contre-les-medicaments-contrefaits-et-si-la-solution-etait-en-la-blockchain/>.
- [14] *Lois et réglementations relatives à la traçabilité applicables à toute industrie*. URL : [https://www.keyence.fr/ss/products/marketing/traceability/law\\_basic.jsp](https://www.keyence.fr/ss/products/marketing/traceability/law_basic.jsp).
- [15] Laurent MANYRI. “Approche stratégique et informationnelle des flux de médicaments contrefaits dans la chaîne logistique pharmaceutique aux Etats-Unis.” In : ().
- [16] Tobias MEYER, Marlene KUHN et Evi HARTMANN. “Blockchain technology enabling the Physical Internet : A synergetic application framework”. In : *Computers & industrial engineering* 136 (2019), p. 5-17.
- [17] Mohamed Ahmed MOHAMED, Chantal TACONET et Mohamed Ould Mohamed LEMINE. “La traçabilité dans les chaînes logistiques en utilisant l’IoT et la blockchain”. In : *Evolution des SI : vers des SI Pervasifs ?* T. 2019. 1. 2019, p. 1-10.
- [18] Paola OVIEDO. “Quel est le rôle de la technologie Blockchain dans la Logistique et la Supply Chain?”. In : (2020).

- [19] Nathan SICARD. “Méthodologie de conception et d’implémentation de la technologie blockchain dans le secteur industriel”. Thèse de doct. Université du Québec à Trois-Rivières, 2023.
- [20] Edvard TIJAN et al. “Blockchain technology implementation in logistics”. In : *Sustainability* 11.4 (2019), p. 1185.
- [21] USAID. *Un guide pratique pour la gestion de la chaîne d’approvisionnement des produits de santé*. URL : <https://www.doc-developpement-durable.org/file/sante-hygiene-medecine/Manuel%20de%20logistique%20pour%20approvisionnement%20en%20produits%20de%20sante%20-%20USAID.pdf>.
- [22] M Cédric VILLANI et M Gérard LONGUET. *Les enjeux technologiques des blockchains (chaînes de blocs)*. Rapp. tech. tech. rep, 2018.

## Résumé :

Ce projet vise à améliorer la traçabilité dans la chaîne d'approvisionnement pharmaceutique en utilisant la technologie Blockchain. Cette chaîne complexe, incluant fournisseurs, laboratoires, grossistes, pharmacies et livreurs, nécessite une traçabilité rigoureuse pour garantir l'authenticité et la qualité des médicaments. Grâce à ses caractéristiques d'immuabilité, de décentralisation et de transparence, la Blockchain permet un enregistrement sécurisé et vérifiable de chaque transaction. Ce projet analyse les besoins en traçabilité, les fonctionnalités de la Blockchain, et développe un système de traçabilité. Une application innovante a été créée, permettant aux acteurs de la chaîne d'accéder à des informations fiables et en temps réel sur les produits. Ce travail démontre que l'adoption de la Blockchain peut transformer la gestion et la distribution des médicaments, renforçant ainsi la sécurité et la confiance des consommateurs.

**Mots-clés :** Traçabilité, chaîne d'approvisionnement pharmaceutique, technologie Blockchain, authentification des produits, prévention de la contrefaçon, transparence, sécurité.

## Abstract :

This project aims to improve traceability in the pharmaceutical supply chain using Blockchain technology. This complex chain, which includes suppliers, laboratories, wholesalers, pharmacies, and delivery services, requires rigorous traceability to ensure the authenticity and quality of medications. Thanks to its characteristics of immutability, decentralization, and transparency, Blockchain enables secure and verifiable recording of each transaction. This project analyzes the traceability requirements, Blockchain features, and develops a traceability system. An innovative application has been created, allowing stakeholders in the chain to access reliable and real-time information about the products. This work demonstrates that the adoption of Blockchain can transform the management and distribution of medications, thereby enhancing consumer safety and trust.

**Keywords :** Traceability, pharmaceutical supply chain, Blockchain technology, product authentication, counterfeiting prevention, transparency, security.

## ملخص :

يهدف هذا المشروع إلى تحسين التتبع في سلسلة التوريد الدوائية باستخدام تكنولوجيا Blockchain. تتطلب هذه السلسلة المعقدة، التي تشمل الموردين والمختبرات وتجار الجملة والصيديات وخدمات التوصيل، تتبعًا دقيقًا لضمان أصالة وجودة الأدوية. بفضل خصائصها في عدم القابلية للتغيير واللامركزية والشفافية، تتيح Blockchain تسجيلًا آمنًا ويمكن التحقق منه لكل معاملة. يحلل هذا المشروع متطلبات التتبع وميزات Blockchain ويطور نظام تتبع. تم إنشاء تطبيق مبتكر يتيح لأصحاب المصلحة في السلسلة الوصول إلى معلومات موثوقة وفي الوقت الحقيقي عن المنتجات. يوضح هذا العمل أن تبني Blockchain يمكن أن يحول إدارة وتوزيع الأدوية، مما يعزز سلامة وثقة المستهلكين.

**الكلمات المفتاحية :** تتبع، سلسلة التوريد الصيدلانية، تكنولوجيا البلوكشين، مصادقة المنتجات، منع التزييف، الشفافية، الأمان.