



HAL
open science

Gestion de ressources industrielles connectées et partagées par approche comportementale

Shiming Liu

► **To cite this version:**

Shiming Liu. Gestion de ressources industrielles connectées et partagées par approche comportementale. Sciences de l'ingénieur [physics]. Université de Lorraine, 2023. Français. NNT : 2023LORR0271 . tel-04688094

HAL Id: tel-04688094

<https://hal.univ-lorraine.fr/tel-04688094v1>

Submitted on 4 Sep 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



**UNIVERSITÉ
DE LORRAINE**

**BIBLIOTHÈQUES
UNIVERSITAIRES**

AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact bibliothèque : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr
(Cette adresse ne permet pas de contacter les auteurs)

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>

Université de Lorraine

École doctorale IAEM-Lorraine (Informatique, Automatique,
Électronique-Électrotechnique et Mathématique)

Thèse

Pour obtenir le grade de

Docteur de l'Université de Lorraine

Spécialité Automatique, Traitement du Signal et des Images, Génie Informatique

Par

Shiming LIU

Sujet de la thèse :

Gestion de ressources industrielles connectées et partagées
par approche comportementale

Soutenue le 15 décembre 2023

Composition du jury :

<u>Président :</u>	Dimitri LEFEBVRE	Professeur, Université Le Havre Normandie
<u>Rapporteurs :</u>	Lionel AMODEO	Professeur, Université de Technologie de Troyes
	Damien TRENTESAUX	Professeur, INSA Haut De France
<u>Examineur :</u>	Hoai An LE THI	Professeur, Université de Lorraine
<u>Directrice de thèse :</u>	Sophie HENNEQUIN	MCF HDR, Université de Lorraine
<u>Co-Encadrant de thèse :</u>	Daniel ROY	MCF, Université de Lorraine

Remerciements

Au terme de cette thèse de doctorat, j'exprime ma profonde gratitude à Madame Sophie HENNEQUIN, Maître de conférences (HDR), Directrice des Études à l'École Nationale d'Ingénieurs de Metz - Université de Lorraine et Monsieur Daniel ROY, Maître de conférences à l'École Nationale d'Ingénieurs de Metz - Université de Lorraine, mes directeurs de thèse pour m'avoir permis de faire cette thèse sous leur direction et pour m'avoir donné l'opportunité de participer à leurs projets de recherche. Je les remercie tout particulièrement pour la confiance qu'ils m'ont accordée tout au long de mes travaux de thèse.

Je remercie très sincèrement mes rapporteurs, Monsieur Lionel AMODEO, Professeur à l'Université de Technologie de Troyes et Monsieur Damien TRENTESAUX, Professeur à l'INSA Haut De France de m'avoir fait l'honneur d'accepter d'évaluer mon travail de recherche.

Je remercie très vivement mes examinateurs, Madame Hoai An LE THI, Professeur à l'Université de Lorraine et Monsieur Dimitri LEFEBVRE, Professeur à l'Université Le Havre Normandie pour l'honneur qu'ils m'ont fait d'être membres du jury et d'apprécier mon travail.

Je remercie aussi Monsieur Didier ANCIAUX, Maître de conférences (HDR) à l'Université de Lorraine et Monsieur Thomas CORTADE Maître de conférences à l'Université de Montpellier pour leurs participation au comité de suivi de ma thèse, l'évaluation de mes travaux de recherche et pour leurs commentaires perspicaces et critiques.

Je souhaite également remercier Monsieur Philippe LALANDA, Professeur à l'Université Grenoble Alpes qui m'a recommandé de faire cette thèse.

Je remercie tous les membres du LGIPM et l'École Nationale d'Ingénieurs de Metz. Un grand merci à mon collègue docteur Monsieur Mohammad Amin YAZDANI.

Je souhaite également remercier toutes les personnes de Sully Group, qui m'ont aidé au cours de la thèse. En particulier, un grand merci, à Monsieur Gilles CHALAYE, Directeur chez Sully Group et Monsieur Eric ROYER, Directeur ressources humaines chez Sully Group. Je leur suis reconnaissant pour tout le soutien qu'ils m'ont apporté.

À tous mes amis, proches ou loin.

A ma famille.

Abstract

Companies face many difficulties : increase of costs (energy, human resources, resources of production, etc.), rarefaction of some raw materials linked to the overexploitation of them, increasing constraints imposed by states (regulations, standards, etc.) and markets (personalization desired by customers, accountability in terms of sustainable development and increased competition). These various difficulties have led the scientific and international community to propose new modes of production and consumption more respectful with environment and society.

Among the proposed methods, the sharing of industrial resources between companies is an organizational method that can be beneficial for companies to solve problems related to sustainable development while allowing them to increase their profit and satisfy their customers. It should be noted that the sharing of resources can be carried out through collaborations between competing, potentially competing or related companies (consortium, association, joint venture, etc.). This type of business-to-business relationship can be studied according to different approaches (organizational, systemic, behavioral, etc.).

In this thesis work, we propose new strategies and methods for adapting resource sharing. We propose a model of sharing strategies based on game theory that makes it easy to identify the behavior of individuals during sharing. We present a digital platform for sharing connected industrial resources based on a multi-agent system and blockchains in the context of industries 4.0 and 5.0. The multi-agent system enables resource use decisions to be made, in particular the matching process between requests and offers. The matching process enables resources to be shared on the basis of our chosen agents. A numerical application is proposed to highlight the considered matching problem.

Keywords

Industry 4.0 and 5.0, Multi-agent system, Blockchain, Internet of Things, Numerical platform, Resource sharing, Matching problem, Supply chain, Pooled warehouses, Game theory, Cooperative games.

Résumé

Les entreprises, quelle que soit leur taille et quel que soit leur regroupement en réseaux d'entreprises, rencontrent de nombreuses difficultés comme une augmentation des coûts (énergie, ressources humaines, ressources de production, etc.), la raréfaction de certaines matières premières liée à la surexploitation de celles-ci, des contraintes toujours plus fortes imposées par les États (réglementations, normes...) et les marchés (personnalisation souhaitée par les clients, responsabilisation en termes de développement durable des entreprises exigée par la société et concurrence accrue). Ces différentes difficultés ont mené la communauté scientifique et internationale à proposer d'une part de nouveaux modes de production et de consommation plus respectueux de l'environnement et de la société mais également à optimiser au mieux les différents moyens utilisés au sein des entreprises.

Parmi les méthodes proposées, le partage de ressources entre entreprises est un outil organisationnel qui peut être intéressant pour les entreprises pour résoudre les problématiques liées au développement durable tout en leur permettant d'augmenter leur profit et satisfaire leurs clients. En effet, le partage de ressources permet, d'une part, la maximisation du gain des entreprises partenaires et la minimisation du risque vis-à-vis de la concurrence, et d'autre part, il peut permettre d'agir sur l'empreinte écologique des entreprises par la mise en commun d'une ressource et donc la réduction de moyens.

Dans ce travail de thèse nous proposons de nouvelles stratégies et méthodes adaptées au partage de ressources. Nous proposons un modèle de partage basé sur la théorie des jeux permettant d'identifier facilement les comportements des individus pendant le partage. Nous présentons une plateforme numérique de partage de ressources industrielles connectées basée sur un système multi-agents et des blockchains dans le cadre des industries 4.0 et 5.0. Le système multi-agents permet de prendre des décisions concernant l'utilisation des ressources, notamment le processus d'appariement entre les demandes et les offres. Ce processus d'appariement permet de partager les ressources sur la base des choix de nos agents. Une application numérique est proposée pour mettre en évidence le problème d'appariement considéré.

Mots clés

Industries 4.0 et 5.0, Système multi-agents, Blockchain, Internet des objets, Plateforme numérique, Partage de ressources, Problème de l'appariement, Chaîne logistique, Entrepôts mutualisés, Théorie des jeux, Jeux coopératifs

Table des matières

Liste des figures	10
Liste des tableaux	11
Liste des publications	12
Liste des notations	13
Liste des sigles utilisés	17
1. Introduction Générale	20
1.1. Contexte et enjeux des entreprises	20
1.2. Gestion de ressources industrielles connectées et partagées	20
1.3. Objectif et Positionnement	21
1.4. Plan de la thèse	22
2. Renouveau des pratiques du partage de ressources	24
2.1. Introduction	24
2.2. Principe du partage de ressources	25
2.2.1. Économie de partage	25
2.2.2. Types de ressources partagées	27
2.3. Approches pour le partage de ressources	30
2.3.1. Approche organisationnelle	30
2.3.2. Approche législative/juridique	31
2.3.3. Approche comportementale	31
2.3.3.1. Théorie des jeux	32
2.3.3.2. Système multi-agents	35
2.3.3.3. Autres approches	37
2.4. Innovations technologiques du partage de ressources	38
2.4.1. Numérisation du partage	39
2.4.2. Ressources connectées	41
2.5. Conclusion	46

3. Gestion du partage de ressources industrielles entre entreprises	50
3.1. Introduction	50
3.2. Partage de ressources industrielles	51
3.2.1. Principe du partage numérique entre entreprises	51
3.2.2. Paramètres clés pour la mise en place d'un partage entre entreprises	52
3.3. Étude des comportements par la théorie des jeux	54
3.3.1. Principe et choix du modèle	54
3.3.2. Modèle	55
3.4. Exemple d'application : mutualisation logistique	59
3.5. Conclusion	66
4. Plateforme de partage	69
4.1. Introduction	69
4.2. Architecture proposée	69
4.2.1. Principe	70
4.2.2. IoT – Système physique	74
4.2.3. Blockchain	76
4.2.4. Système multi-agents	78
4.3. Principe de fonctionnement	82
4.3.1. Interactions dans les Swimlanes	82
4.3.1.1. Swimlane du niveau stratégique	82
4.3.1.2. Swimlane du modèle de partage des ressources	83
4.3.2. Échange de données	85
4.4. Conclusion	88
5. Service de partage – l'appariement	91
5.1. Introduction	91
5.2. Appariement	91
5.3. Modélisation mathématique	94
5.3.1. Paramètres et variables	94
5.3.2. Formulation	96
5.3.2.1. Transformation en taux corrélés (vision des clients)	97
5.3.2.2. Transformation en taux corrélés (vision du fournisseur)	98
5.3.2.3. Fonction bi-objective du problème d'appariement	99
5.4. Application numérique	101
5.4.1. Étude de cas 1 - Analyse de l'influence des paramètres	101

5.4.2. Étude de cas 2 - Utilité attendue sous différents algorithmes de résolution	106
5.5. Conclusion	114
6. Conclusion Globale et Perspectives	116
6.1. Conclusions sur le travail mené	116
6.2. Perspectives à nos travaux	118
Bibliographie	120
Annexe	133

Liste des figures

Figure 2.1 Structure de la blockchain.....	44
Figure 3.1 Exemples de gains obtenus par l'entreprise.....	66
Figure 4.1 Interactions entre les différents modules de la plateforme.	72
Figure 4.2 Architecture proposée.	73
Figure 4.3 La structure en couches de l'architecture de IIoT et lien avec la blockchain.....	75
Figure 4.4 Les sept agents dans le SMA.	78
Figure 4.5 Liens entre le monde physique et notre plateforme.	82
Figure 4.6 Swimlane du niveau stratégique.	83
Figure 4.7 Swimlane du modèle de partage des ressources.	84
Figure 4.8 Le processus d'exploration des pages web.....	85
Figure 4.9 Le processus de Learning Agent.....	86
Figure 5.1 Le processus d'appariement. (Liu et al., 2022).....	92
Figure 5.2 Le processus de transformation.	100
Figure 5.3 Impact de la moyenne des valeurs de la fonction objectif (AF) entre les offres et les besoins ($m = n$).....	104
Figure 5.4 Impact de la moyenne des valeurs de la fonction objectif (AF) entre les offres et les besoins ($2*m = n$).....	105
Figure 5.5 Impact de la moyenne des valeurs de la fonction objectif (AF) entre les offres et les besoins ($10*m = n$).....	106
Figure 5.6 Utilité attendue des demandes selon différents algorithmes.....	109
Figure 5.7 Utilité attendue des offres selon différents algorithmes.	110
Figure 5.8 Utilité attendue pour les demandes et les offres selon différents algorithmes.....	111
Figure 5.9 Scénarios multiples de l'utilité attendue sous différents algorithmes.	112

Liste des tableaux

Tableau 2.1 Théorie des jeux appliqués au partage de ressources	33
Tableau 2.2 Systèmes multi-agents appliqués au partage de ressources.....	35
Tableau 3.1 Modèle de deux entreprises compétitives sous la forme d'une matrice des gains et des risques	55
Tableau 3.2 Exemple numérique de deux entreprises concurrentes sous la forme d'une matrice des profits lié au partage.....	57
Tableau 5.1 Le degré de satisfaction de la demande (α_{ij}).....	101
Tableau 5.2 Le degré de satisfaction de l'offre (β_{ij}).....	102
Tableau 5.3 Liste de la valeur du caractère aléatoire pour λ_1 et λ_2	103
Tableau 5.4 Le degré de satisfaction de la demande (α_{ij}).....	107
Tableau 5.5 Le degré de satisfaction de l'offre (β_{ij}).....	108
Tableau 5.6 Les paires appariées pour les demandes ($\lambda_1 = 1, \lambda_2 = 0$) par des algorithmes de comparaison	109
Tableau 5.7 Les paires appariées d'offres ($\lambda_1 = 0, \lambda_2 = 1$) par des algorithmes de comparaison	110
Tableau 5.8 Les paires appariées de demandes et d'offres comme objectif unique ($\lambda_1 = \lambda_2 = 0,5$) par des algorithmes de comparaison	111
Tableau 5.9 Les paires appariées avec un objectif différent (algorithme <i>KM</i> pour résoudre la maximisation de l'appariement modèle)	112

Liste des publications

Article publié dans une revue

[SLA] S. Liu, D. Roy, and S. Hennequin (2020). Blockchains and Internet of Things for the Pooling of Warehouse Resources, South Asian Journal of Social Studies and Economics, SCIENCEDOMAIN international (SDI), 2020.

Actes publiés en conférences internationales

[SL1] S. Liu, M. A. Yazdani, S. Hennequin and D. Roy (2022), Cloud Architecture based Multi agent Platform for Matching in Resource Sharing, 2022 10th IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management and Control (IFAC MIM 2022), June 22-24, 2022, Nantes, France. IFAC-PapersOnLine, Elsevier.

[SL2] S. Liu, S. Hennequin and D. Roy (2021), Cloud architecture based multi agent system for a resources sharing application platform, 2021 IEEE 17th International Conference on Automation Science and Engineering (IEEE CASE 2021), August 23-27, 2021, Lyon, France.

[SL3] S. Liu, S. Hennequin and D. Roy (2021), Enterprise Platform of Logistics Services Based on a Multi-Agents Mechanism and Blockchains, 2021 17th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing (IFAC INCOM 2021). IFAC-PapersOnLine, Elsevier.

[SL4] S. Liu, D. Roy, and S. Hennequin (2020). Hybrid architecture for the control of industrial IoTs, Modelling and Simulation 2020 – 34th European Simulation and Modelling Conference, (ESM 2020) in Toulouse, France.

[SL5] S. Liu, D. Roy, and S. Hennequin (2019) Connected Industrial Resources Management by Multi agent and Blockchain Systems, Communication conference (DMOM 2019), Agadir, Morocco, 2019.

[SL6] S. Liu, D. Roy, and S. Hennequin (2019). Mutualisation décentralisée des activités d'entreposage à l'aide de blockchains, (Prolog 2019) à Metz, France.

[SL7] S. Liu, D. Roy, and S. Hennequin (2018). Blockchains and Smart Contracts for the Management, Control and Security of Industrial IoTs, Proceedings of Industrial Internet of Things and Smart Manufacturing conference, (IoTsm 2018), September 2018, London, UK.

Liste des notations

❖ Chapitre 3 : Modèle basé sur la théorie des jeux

Cd_{max}	Coût de distribution plus élevé de l'entreprise
Cd_{min}	Coût de distribution plus faible de l'entreprise
$Risk_{max}$	Risques maximum pour l'entreprise
$Risk_{min}$	Risques minimum pour l'entreprise
N	Nombre total d'entreprises
k	Période k
$N^+(k)$	Nombre d'entreprises qui veulent participer à une mise en commun des ressources
$S(k)$	Nombre d'entreprises en fonction des besoins de ressources
$v(S(k))$	Gain global économique résultant de la mise en commun des ressources
$v_i(S(k))$	Part de gain économique à chaque période k , pour chaque entreprise i , avec i dans $N^+(k)$
$v^*(k)$	Gain maximal pour des entreprises $N^+(k)$ à chaque période k et leurs besoins (en termes de ressources et de services)

❖ Chapitre 3 : Modèle pour la mutualisation logistique

E_i	Entreprise
r	Ressource
k	Période k
$Sup(k)$	Surface totale de stockage de nombre maximal de palettes
$SCDup(k)$	Surface totale de stockage pour la zone de masse des marchandises
$Q^i(k)$	Quantité de marchandises pour i pendant k
$C_{storage}^i(S^j(k), Q^i(k))$	Coûts d'inventaire
$S^j(k)$	Coalition
$a_{S^j}^i(k)$	Coût fixe lié à la mise en œuvre de l'inventaire requis
$b_{S^j}^i(k)$	Coût variable lié à la mise en œuvre de l'inventaire requis
$\alpha_{mass}^i(k)$	Valeurs connues dans $[0, 1]$ dépendant du volume et de la masse des marchandises

$\alpha_{classical}^i(k)$	Valeurs connues dans [0, 1] dépendent du volume des palettes
$L_{services}^i(k)$	Besoins en services logistiques
$T_{services}^i(k)$	Temps passé pour tous les services pendant k
$T_{services-sup}(k)$	Contrainte de capacité temporelle pendant k pour tous les services
$C_{logSj}^i(S^j(k), Q^i(k))$	Coûts des services logistiques
$v_{storage}$	Fonction d'utilité correspondant aux ressources de stockage
v_{log}	Fonction d'utilité correspondant aux services logistiques
$Max \pi_{Sj}^i(S^j(k), Q^i(k))$	Bénéfice total

❖ Chapitre 5 : Modèle mathématique d'appariement - Offres

n	Nombre de ressources/services des offres
O_i	Offre i
$char_{avgi}$	Caractéristique de l'offre O_i
p_i	Prix de vente de l'offre O_i , donné par unité de temps de l'opération.
SR_i	Indice de service de l'offre O_i
SR_{ij} O_i	Taux de service pour une demande spécifique D_j et une offre spécifique O_i
SR_{ijmax}	Taux de service maximal pour une demande spécifique D_j et une offre spécifique O_i
SR_{ijmin}	Taux de service minimum pour une demande spécifique D_j et une offre spécifique O_i
AT_i	Temps disponible de l'offre O_i
AT_{ij}	Temps disponible pour une demande précise D_j et une offre précise O_i
ATR_{ij}	Taux du temps d'affectation pour une demande spécifique D_j et une offre spécifique O_i
ATR_{ijmax}	Taux du temps d'affectation maximale pour une demande spécifique D_j et une offre spécifique O_i
ATR_{ijmin}	Taux du temps d'affectation minimum pour une demande spécifique D_j et une offre spécifique O_i
W_{OA1}	Poids de l'attribut de l'adéquation pour les offres

W_{OA2}	Poids de l'attribut de la notation d'attribution pour les offres
W_{OA3}	Poids de l'attribut de l'indice de priorité des demandes pour les offres
$OCR1ij$	Taux corrélé d'adéquation pour les offres
$OCR2ij$	Taux d'affectation corrélé pour les offres
$OCR3ij$	Taux de corrélation de la priorité de la demande pour les offres
β_{ij}	Degré de satisfaction des offres
λ_2	Importance de la préférence du côté du fournisseur

❖ Chapitre 5 : Modèle mathématique d'appariement - Demandes

m	Nombre de ressources/services logistiques des besoins
D_j	Besoin j
$char_{maxj}$	Valeur maximale acceptable de la caractéristique souhaitée de la demande D_j
$char_{minj}$	Valeur minimale acceptable de la caractéristique souhaitée de la demande D_j
OT_j	Temps de fonctionnement de la demande D_j
OT_{ij}	Temps de fonctionnement pour une demande spécifique j et une offre spécifique O_i
p_{ij}	Prix pour une demande spécifique j et une offre spécifique O_i
PR_j	Indice de priorité de la demande de la demande D_j
PR_{ij}	Indice de priorité de la demande pour une demande spécifique D_j et une offre spécifique O_i
$PR_{ij_{max}}$	Indice maximal de priorité de la demande pour une demande spécifique D_j et une offre spécifique O_i
$PR_{ij_{min}}$	Indice Minimum de priorité de la demande pour une demande spécifique D_j et une offre spécifique O_i
C_{ij}	Coût pour une demande spécifique D_j et une offre spécifique O_i
$C_{ij_{max}}$	Coût maximal pour une demande spécifique D_j et une offre spécifique O_i
$C_{ij_{min}}$	Coût Minimum pour une demande spécifique D_j et une offre spécifique O_i
W_{DA1}	Poids de l'attribut d'adéquation pour les demandes
W_{DA2}	Poids de l'attribut de coût pour les demandes
W_{DA3}	Poids de l'attribut de taux de service de offres pour les demandes
$DCR1ij$	Taux corrélé d'adéquation pour les demandes
$DCR2ij$	Coût corrélé pour les demandes

DCR_{3ij}	Taux de service corrélé pour les demandes
α_{ij}	Degré de satisfaction des demandes
λ_l	Importance de la préférence du côté du client

Liste des sigles utilisés

API	Application Programming Interface
AWS	Amazon Web Services
B2B	Business-to-Business
B2C	Business-to-customer
C2C	Customer-to-customer
CA	Autorité de certification (Certificate Authority)
CRM	Customer Relationship Management
CSV	Comma-separated values
ERP	Enterprise Resource Planning
GCP	Google Cloud Plateform
GPS	Système mondial de positionnement (Global Positioning System)
GraphQL	Graph Query Language
HTML	HyperText Markup Language
HTTP	Protocole de transfert hypertexte (Hypertext Transfer Protocol)
IA (AI)	Intelligence artificielle (Artificial intelligence)
IaaS	Infrastructure as a Service
IoT	Internet of Things
IIoT	Industrial Internet of Things
JSON	JavaScript Object Notation
NFC	Communication en champ proche (near-field communication)
ONG	Organisation non gouvernementale
PaaS	Platform as a Service
P2P	Pair à pair (Peer-to-peer)
PL	Prestataires Logistiques
PLM	Product Lifecycle Management
PME	Petites et moyennes entreprises
REST	Representational state transfer
RFID	Radio-identification (radio frequency identification)
SaaS	Software as a Service
SMA (MAS)	Système multi-agents (multi-agent system)

SOAP	Simple Object Access Protocol
TPS	Transactions par seconde (Transactions per second)
URL	Localisateur uniforme de ressource (Uniform Resource Locator)
WMS	Système de gestion d'entrepôt (Warehouse Management System)
WSN	Réseau de capteurs sans fil (Wireless sensor networks)
XML	Extensible Markup Language
YAML	Yet Another Markup Language

1. Introduction Générale

1.1. Contexte et enjeux des entreprises

Les défis liés au développement durable, le marché concurrentiel toujours plus dense et les exigences des clients et des gouvernements obligent les entreprises à changer leur paradigme et à proposer et développer de nouvelles stratégies. Parmi les stratégies développées, le partage des ressources est une activité qui a prouvé son efficacité. En effet, elle permet non seulement des bénéfices environnementaux mais aussi des gains économiques et permettrait de fusionner des ressources et certaines activités qui peuvent être mises en commun avec un respect total des contraintes et une facturation précise. En outre, ces dernières années de très grandes modifications dans les pratiques industrielles et commerciales (robotisation et numérisation, beaucoup de données diverses disponibles et big data analysis, poids des gouvernements et guerre économique...) ont pu être observées.

Partant de ces constats, il semble que travailler sur la gestion de ressources industrielles connectées et partagées en considérant que :

- De fortes modifications tant internes qu'externes sont nécessaires pour répondre/résister à ces bouleversements ;
- Il est nécessaire de proposer des nouvelles stratégies et méthodes et/ou d'adapter d'anciennes au contexte actuel ;
- Il faut un cadre avec adaptation de l'économie de partage aux outils de numérisation et de technologie de l'information des échanges et interactions ;

Soit porteur de développements intéressants pour les entreprises. D'où le sujet de ce travail de thèse : Proposition d'un cadre pour la gestion de ressources industrielles partagées via une plateforme numérique.

1.2. Gestion de ressources industrielles connectées et partagées

Il est à noter que le partage de ressources peut s'effectuer à travers des collaborations entre des entreprises concurrentes, potentiellement concurrentes ou liées (groupement, association, joint-venture, etc.). Ce type de relations interentreprises peut être étudié selon différentes approches (organisationnelle, systémique, comportementale, etc.). Nous avons choisi une

approche comportementale basée sur l'utilisation de systèmes multi-agents. En effet, les systèmes multi-agents nous permettront de décrire au mieux le comportement des différents acteurs (entreprises utilisant les ressources et/ou entreprises gérant les ressources) et d'analyser les interactions/liens entre acteurs.

Les ressources industrielles partagées considérées sont connectées et reliées à l'aide d'un réseau Internet des Objets (IoT). Ce type de réseau est centralisé et géré par une entité principale ce qui peut limiter l'utilisation optimale des ressources partagées (d'un point de vue technique et économique mais également sous des angles sociaux et environnementaux) et peut poser aussi des problèmes de sécurisation des données pour les différentes entreprises utilisatrices de l'IoT et par conséquent peut remettre en cause celui-ci. C'est pourquoi, nous avons choisi d'utiliser la technologie des blockchains pour définir un mécanisme global de gestion robuste, de contrôle et de sécurisation des couches de l'IoT industriel considéré. En effet, bien que l'applicabilité des blockchains aux IoT reste encore limitée, l'architecture décentralisée offerte par les blockchains modifie directement l'architecture des objets connectés, ce qui facilite non seulement leur gestion, mais offre également davantage de possibilités pour leur organisation et pas uniquement en termes de sécurité.

Cependant, beaucoup de questions restent à développer comme : les connectivités entre toutes les couches architecturales de l'IoT proposé et son lien avec les autres éléments du système proposé ; l'identification et la spécificité des différents mineurs des blockchains et acteurs du systèmes multi-agents en précisant les rôles de chacun, ainsi que la gestion complète du système proposé en lien avec les objectifs identifiés lors de la définition du modèle comportemental (système multi-agents).

1.3. Objectif et Positionnement

Dans ce travail, nous considérons un fournisseur qui offre des ressources partagées (comme des postes de travail, des espaces de stockage, des services, etc.) à des clients (entreprises). Ces ressources sont connectées à travers un réseau industriel d'IoT. Les clients peuvent avoir des caractéristiques diverses voire être concurrents sur un marché donné. Les besoins peuvent donc être différents. De plus, nous souhaiterions avoir une approche dynamique afin d'intégrer des évolutions ou des changements de comportements.

Notre objectif est de créer des solutions, si possible, durables, via notamment une plateforme cloud, en utilisant des technologies phares de l'industrie 5.0 pour faciliter et

améliorer le développement de partage de ressources industrielles entre entreprises, pour rationaliser l'utilisation des ressources via une allocation optimale et enfin permettre de maximiser le gain des entreprises partenaires et minimiser le risque vis-à-vis de la concurrence entre des acteurs du marché.

1.4. Plan de la thèse

Le présent mémoire décrit nos travaux de recherches selon l'organisation suivante.

Dans le deuxième chapitre, nous menons une étude bibliographique portant sur le partage de ressources (au sens large) et son évolution dans le temps, avec un focus sur les études et travaux utilisant les nouvelles technologies informatiques et de communication développées.

Dans le troisième chapitre, nous présenterons les éléments clés pour la prise de décision du partage avec une étude des comportements des acteurs par la théorie des jeux. Cette étude est appliquée dans le cadre de la gestion des activités mutualisées dans un entrepôt logistique (cas d'une mutualisation du transport et des activités d'entreposage). L'approche utilisée est basée sur la théorie des jeux pour identifier les comportements des acteurs (entreprises participant à la mutualisation) et le partage entre les entreprises ([SLA] et [SL7]).

Dans le quatrième chapitre, nous détaillons l'architecture proposée pour le partage de ressources industrielles connectées. Cette architecture globale permet de piloter le partage de ressources avec une partie basée sur un système multi-agents connecté au cloud (centralisation et hiérarchisation des activités) ainsi qu'une blockchain permettant de sécuriser les échanges et l'utilisation des objets connectés via l'IoT ([SL1], [SL5] et [SL6]).

Le dernier chapitre, nous permet d'aborder une partie de la gestion des ressources industrielles et connectées qui correspond à l'appariement (ou matching) entre les offres et les besoins identifiés. L'identification détaillée des interactions entre la blockchain et l'IoT ([SL3]) ainsi que le détail des activités de matching ([SL1] et [SL2]) sont précisés. Le fonctionnement complet de la plateforme ainsi proposée est également défini ([SL4]). Des simulations pour ce problème d'appariement sont proposées, simulations basées sur différents algorithmes pour valider notre proposition.

Enfin une conclusion générale ainsi que des perspectives à nos travaux sont proposées en fin de mémoire.

2. Renouveau des pratiques du partage de ressources

2.1. Introduction

Suite à la révolution des technologies de l'information et de la communication, l'environnement industriel a notablement changé ces dernières années (Ageron *et al.*, 2020). Ces transformations permettent d'obtenir un avantage concurrentiel ainsi qu'une valeur élevée et pérenne pour les entreprises. Les principales technologies développées et utilisées actuellement sont l'analyse des big data, l'Internet des objets, les technologies cloud, l'informatique cognitive et plus récemment les blockchains (Attaran, 2020). Ces technologies facilitent le développement de nouvelles activités et de nouveaux services, la collaboration entre les parties prenantes et la construction de nouveaux modèles économiques. Cependant, d'importantes barrières doivent être levées. Ces barrières concernent, sans être exhaustif, la maturation des projets avec bien sûr des leviers technologiques, la difficulté à gérer l'organisation et à déployer des stratégies, mais aussi des problèmes de confidentialité, d'intégrité et de sécurité des données (Frederico *et al.*, 2019 ; Koh *et al.*, 2020). Ces barrières peuvent affecter drastiquement les résultats attendus et les modèles économiques. Il est donc essentiel de bien gérer les processus créatifs et la définition des nouveaux services d'entreprise ainsi offerts.

En parallèle, le développement de nouvelles stratégies de mutualisation et de partage entre différents acteurs (États, population, entreprises, banques, ONG, fournisseurs, clients...) crée des opportunités qui permettent de maximiser l'utilisation des ressources (Rouquet & Vauché, 2015). Les avantages se traduisent principalement par l'optimisation de l'allocation et de la circulation des ressources, la réduction des gaspillages de ressources et la réalisation de bénéfices importants pour les parties intéressées. Le partage de ressources, quel que soit le type de ressources partagées, s'est ainsi largement développé, de la forme la plus simple (partage d'une ressource commune comme le transport entre deux acteurs ayant des besoins identiques et symétriques) à la plus complexe (partage de services de nature différente pour répondre aux besoins divers d'un réseau d'acteurs). Cependant, de nombreuses problématiques restent en suspens comme par exemple l'allocation dynamique efficiente des ressources, la traçabilité des actions, la juste rétribution en fonction de l'utilisation réelle, la gestion des données personnelles des utilisateurs qui ne peut pas toujours être garantie, etc. De plus, il existe un certain vide juridique au niveau européen et international pour l'encadrement des contrats de

coordination et d'échange (Villa & Bruno, 2013). Cependant de nombreux travaux ont permis de répondre à différentes difficultés et le partage de ressources qui existe depuis l'apparition de la vie sur Terre et d'autant plus dans toute société grégaire peut ainsi prendre de nouvelles orientations permettant de sécuriser les interactions et les échanges comme nous allons le voir ensemble dans ce chapitre.

Le reste du chapitre est organisé de la façon suivante. Dans la section 2, nous introduisons le principe du partage de ressources. Puis, dans la section 3 nous présentons différentes approches permettant de gérer au mieux le partage de ressources selon les objectifs visés et les caractéristiques identifiées. Dans la section 4, nous détaillons succinctement l'évolution du partage de ressources qui amène aujourd'hui au développement de nouveaux business modèles liés aux plateformes numériques. Nous terminerons ce chapitre par une conclusion sur le renouveau du partage de ressources.

2.2. Principe du partage de ressources

Le principe du partage de ressources entre êtres humains existe depuis longtemps. En effet, l'être humain vivant en groupe organisé, il va partager des activités, des biens et ressources, des compétences, etc. Dans cette première partie, nous allons décrire le principe du partage de ressources et ses principaux avantages et inconvénients.

2.2.1. Économie de partage

Le concept de production et de consommation collaborative et d'économie de partage est très ancien puisqu'il a participé à la survie de l'humanité (Lamberton, 2016).

Le partage de ressources a été initialement décrit comme un mouvement social. "*Sharing, whether with our parents, children, siblings, life partners, friends, coworkers, or neighbors, goes hand in hand with trust and bonding*" (Belk, 2010).

Le concept de ressources partagées n'est donc pas nouveau. Historiquement, "*neighbours have been borrowing tools, family has been lending money to each other and friends have been hosted in friends' houses long before the emergence of the sharing economy model*" (Hatzopoulos & Roma, 2017).

Cependant, "*although there are some exceptions, people tended not to share with strangers or those outside their social networks. Sharing was confined to trusted individuals such as family, friends and neighbours*". Ce qui est vraiment innovant dans l'économie de partage, c'est

l'extension du "partage" au-delà du réseau social d'un individu ou même d'une région. Aujourd'hui, les plateformes de partage facilitent le partage entre des personnes qui ne se connaissent pas et qui ne sont pas amis ou voisins (Frenken & Schor, 2017).

Depuis la révolution industrielle et surtout depuis la production de masse, le concept de propriété d'un bien et de son usage restreint au propriétaire a été le seul modèle économique permettant d'en tirer des bénéfices (Belk, 1988 ; Botsman & Rogers, 2011).

La nature du partage des ressources interentreprises sous la forme d'échanges, d'une symbiose industrielle (Hennequin *et al.*, 2019) ou de mutualisations est de répliquer ce qui était largement autoorganisé. Le concept de commerce et d'échange de ressources est aussi ancien que le partage de nourriture par les peuples primitifs (Chertow, 2007).

Le terme "économie de partage" (en anglais Sharing Economy) a probablement été utilisé pour la première fois en 2008 par le professeur Lawrence Lessig. Il a défini l'économie de partage en termes d'intérêt dans le contexte de la culture et de l'art (Lessig, 2008). L'économie de partage permet le partage de ressources qui peuvent être des biens physiques (une voiture, un réseau d'ordinateurs, etc.), de l'argent (comme les bitcoins), des services (assistance à la personne), des compétences (activités de R&D, de ressources humaines, etc.), des espaces (par exemple une partie d'un entrepôt) (Botsman & Rogers, 2011). Le partage de ressources s'inscrit donc dans ce contexte de l'économie de partage. Selon Belk (2010) : "*Sharing is a fundamental consumer behavior that we have either tended to overlook or to confuse with commodity exchange and gift giving*" et "*Sharing is the act and process of distributing what is ours to others for their use and/or the act and process of receiving or taking something from others for our use*" (Belk, 2007). L'économie de partage a une forte tradition intellectuelle issue du domaine des modes de vie et des mouvements sociaux, de la pratique de la consommation et du paradigme du partage. Elle permet également aux individus, aux communautés, aux organisations et aux décideurs politiques de repenser la manière dont les gens vivent, se développent, se maintiennent et se connectent les uns aux autres (Cheng, 2016).

Au cours des dernières années, de nombreux problèmes sont apparus, comme un marché très concurrentiel et mondial, des exigences des clients très fortes et des pressions exercées via les réseaux sociaux, etc. Pour faire face à ces problématiques, des mécanismes d'appariement, d'ordonnancement et de confiance sont nécessaires pour améliorer la performance des services du partage (notamment l'allocation efficace de ressources en temps réel avec la tarification

dynamique) (Sutherland *et al.*, 2018 ; Wirtz *et al.*, 2019 ; Tafreshian *et al.*, 2020). Par exemple, Yan *et al.*, 2021 ont proposé un algorithme pour le programme du parking partagé privé en temps réel (dans lequel les propriétaires de places de parking privées peuvent prêter leurs places à d'autres automobilistes pour qu'ils puissent se garer lorsque ces places ne sont pas utilisées). Celui-ci permet l'efficacité et l'efficience du processus d'ordonnement en fonction des besoins de parking par les propriétaires et d'autres automobilistes. Hawlitschek *et al.*, 2016 ont étudié trois foyers de confiance dans l'économie de partage : les supports permettant le partage de ressources, les acteurs et les produits. Les auteurs ont constaté qu'il existe une forte corrélation entre la confiance et l'intention de consommation. Il est donc essentiel d'instaurer et de maintenir la confiance dans l'économie de partage. La transparence fondée sur la confiance et la sécurité est l'élément clé d'une économie de partage (D'Hauwers *et al.*, 2020). L'économie de partage apparaît donc comme un outil organisationnel présentant des caractéristiques particulières. Ainsi, l'économie de partage est un système socio-économique construit autour du partage de biens/ressources entre individus dont les impacts sur les pratiques industrielles et commerciales peuvent être importants. Il est donc essentiel de renforcer la confiance et d'améliorer la sécurité lors du partage afin d'améliorer celui-ci et d'augmenter le nombre de participants. Cependant, selon les caractéristiques du partage : type de ressources, organisation, caractérisation des acteurs, les leviers d'actions pourraient être différents. C'est pourquoi, dans ce qui suit, nous présentons les différents types de partage en commençant par les ressources qui pourraient être partagées.

2.2.2. Types de ressources partagées

De nombreux types de ressources peuvent être partagés amenant à des caractéristiques différentes en termes de comportement des acteurs et de réalisation du partage. Ces ressources ont des caractéristiques très diverses et selon leurs particularités, le partage varie.

Dans la littérature, nous pouvons citer par exemple le partage :

- *Des ressources physiques* (comme des machines, des robots, des voitures, un réseau informatique, etc.). Ces ressources physiques sont souvent connectées pour faciliter la transmission des informations et simplifier la gestion opérationnelle du réseau de ressources physiques dans l'entreprise. Malgré les avantages de la connexion, des risques existent comme des cybers attaques ou des problèmes de non confidentialité des données etc. (Zhong *et al.*, 2022) ont proposé un modèle pour améliorer le

partage de services d'imprimantes 3D basé sur un système de service lié aux produits. Bien qu'il y ait encore certaines limitations (la complexité de mise en place, le coût de calcul élevé etc.), cette approche pourrait être appliquée à certaines applications de partage de ressources, comme la fabrication cloud et les systèmes de production mondiaux qui permettent de minimiser les coûts logistiques et maximiser les gains.

- *Des ressources financières* (l'emprunt bancaire, fonds d'investissement, cryptomonnaies, etc.). Les entreprises veulent soit placer leur argent inutilisé pour l'investir afin de générer des bénéfices, soit chercher des financements pour un projet. Le partage de ressources financières permet la mise en relation entre l'offre de financement et la demande de financement. Pour s'assurer que les finances soient rentables et sécurisées, il faut avoir une stratégie organisationnelle et financière claire, solide et transparente du partage de ressources financières (Yu & Shen, 2019 ; Szaller *et al.*, 2023).
- *Des services* (aides à la personne, services de livraison, etc.). La satisfaction des clients représente un enjeu important pour les entreprises qui veulent partager des ressources services. (Yu *et al.*, 2020) ont étudié un système de services de produits partagés ce qui permet à des individus autoorganisés de s'impliquer dans des activités de fabrication. Ils constatent qu'un système de fabrication partagée peut fournir de meilleures performances qu'un système de fabrication traditionnelle. Cependant, de nombreuses difficultés et challenges (la complexité, la dynamique et les incertitudes liées aux opérations de service) existent en termes de complexité (les systèmes adaptatifs et la gestion, etc.), ainsi que de forte dynamique et incertitudes associées aux opérations de service.
- *Des compétences humaines* (recherche et développement, activités de ressources humaines, etc.) ou des connaissances (savoir-faire, inventions, connaissances techniques, etc.). Les compétences sont très importantes pour une entreprise. L'identification des compétences individuelles doit être un élément clé pour mettre en place le partage de ressources de compétences humaines. Le partage de connaissances est l'un des principaux moteurs de développement durable en entreprise (Cugueró-Escofet *et al.*, 2019). En particulier, les pratiques de gestion des

ressources humaines renforçant la capacité, la motivation et l'efficacité de l'équipe par le partage de connaissances (Ma *et al.*, 2017).

- Des espaces physiques (bureaux de travail, espaces de stockage, etc.). De plus en plus d'employés travaillant à distance, les bureaux de travail partagés sont de plus en plus populaires. Ils doivent être flexibles pour les entrepreneurs et les petites entreprises afin de réduire les coûts. Des entrepôts mutualisés entre différentes entreprises sont souvent proposés au sein d'un réseau logistique pour minimiser les coûts et améliorer le service des clients. De nouvelles technologies utilisées avec les éléments physiques du réseau d'objets connectés permettent à l'entreprise de gérer efficacement des espaces physiques (Liu *et al.*, 2020).

Face à ces particularités, il faut donc pouvoir adapter le modèle pour mettre en place un partage de ressources efficace. Bien sûr, chacun de ces types de ressources a des caractéristiques spécifiques (comme l'immatérialité pour les services, les habitudes pour les humains ou la présence pour les biens physiques) qui doivent être prises en compte.

Même si le partage de ressources a de nombreux avantages pour les participants, il a également pas mal d'inconvénients résultants de sa mise en œuvre. Après avoir étudié ces typologies de ressources, il convient à présent de voir les difficultés de mise en œuvre.

Les principales difficultés rencontrées se situent avant la mise en place, dès la phase de conception, et pendant le partage (par exemple, activités de maintenance, entretien, durée et limite d'utilisation, etc.). Ainsi, la maturation des projets soulève des problèmes technologiques avec parfois des freins à lever tels que la difficulté à gérer l'organisation et à déployer des stratégies, mais aussi des problèmes de confidentialité, d'intégrité et de sécurité des données (Frederico *et al.*, 2019 ; Koh *et al.*, 2020). D'autres problèmes peuvent survenir comme les difficultés liées à la mise en place du partage de ressources, ou la traçabilité des données du partage et les mécanismes de coordination.

L'économie de partage peut se révéler être une fracture numérique profonde et peut créer des inégalités sociales et économiques. À mesure que les individus s'impliquent de plus en plus dans le retour d'information, leur vie privée et leur sécurité en ligne sont remises en question (Ganapati & Reddick, 2018). Ces différentes difficultés ont généré la nécessité de définir des approches différentes pour le partage de ressources.

2.3. Approches pour le partage de ressources

Dans cette section, nous décrivons une synthèse de perspectives en gestion stratégique des ressources partagées avec les différentes approches qui sont envisagées pour traiter le problème de partage de ressources, notamment : l'approche organisationnelle, l'approche législative/juridique et l'approche comportementale.

2.3.1. Approche organisationnelle

Le partage de ressources entre entreprises est un outil organisationnel qui peut être bénéfique pour les entreprises tout en leur permettant d'augmenter leur profit et satisfaire leurs clients (Roy *et al.*, 2014). L'organisation permettra d'avoir une vision transversale (ou non) des activités. En termes d'organisation, les approches s'orientent soit vers la centralisation soit vers la décentralisation de l'organisation. O'Mahony et Karp (O'Mahony & Karp, 2022) examinent la question de savoir comment la centralisation par rapport à la décentralisation du processus de prise de décision influencent la participation. La centralisation facilite la coordination et accélère les décisions, alors qu'inversement la prise de décision décentralisée est souvent inefficace en raison de la nécessité, pour obtenir des informations, d'un large éventail de participants. Les avantages qui dominent dépendent de la nature des produits, des acteurs et des marchés de l'écosystème. Giannoccaro (Giannoccaro, 2018) a montré que la gestion décentralisée du processus de prise de décision par un certain nombre de personnes indépendantes est moins efficace qu'une gestion centralisée. Ainsi, pour les problèmes de prise de décision complexes, une organisation centrale doit être privilégiée. La décentralisation de la prise de décision peut encourager la coopération entre les participants lorsqu'il existe des complémentarités intéressantes qui peuvent être réalisées par le biais du codéveloppement ou de l'innovation (Kretschmer *et al.*, 2022).

Choisir une organisation centralisée ou décentralisée a donc un impact sur la répartition des rôles :

- Dans le cadre d'une organisation centralisée, la décision de partage de ressources est contrôlée par un petit nombre d'individus.
- Dans le cadre d'une organisation décentralisée, alors la décision de partage de ressources est répartie entre les membres de l'organisation.

Le choix entre centralisation et décentralisation dépend alors de la stratégie de l'entreprise qui souhaite trouver un juste compromis entre avantages et inconvénients pour le partage de ressources. Une organisation centralisée permet de maintenir les coûts de transaction d'affectation à un niveau bas et utiliser l'information de manière efficace, en revanche une ouverture de la place de marché décentralisée permet de faciliter le choix des produits individuels (Einav *et al.* 2016).

2.3.2. Approche législative/juridique

Face à l'importance croissante des développements autour de l'économie de partage et en découlant du partage des données et des problèmes rencontrés, les pays de l'Union Européenne cherchent des solutions juridiques. D'une manière générale, il est important de tenir compte de l'innovation technologique tout en garantissant le respect d'une concurrence équitable. Le cadre juridique couvrant l'économie de partage peut adopter deux approches : le contrôle gouvernemental (ou la réglementation gouvernementale descendante) ou la réglementation ascendante (ou l'autorégulation par la réputation). Dans la pratique, un mélange des deux approches est nécessaire dans la plupart des cas (Goudin, 2016). Suchman (Suchman, 1995) définit la légitimité comme une perception généralisée des actions organisationnelles. La légitimité et la réputation peuvent impacter le comportement de prise de décision partagée (Truong *et al.*, 2021). Sans une régulation juridique, des excès apparaissent, ce fut le cas pour les véhicules partagés par des sociétés telles que Uber, Lyft et DiDi, et le conflit en découlant avec les sociétés de taxi traditionnelles, qui a entraîné des changements et des améliorations du système juridique. D'autres types de partage de ressources sont confrontés aux mêmes problèmes juridiques tels que les bicyclettes partagées, les espaces de bureau partagés et les logements partagés (Rong & Li *et al.*, 2021). De plus, l'aide juridique joue un rôle important dans la protection des consommateurs (Koopman *et al.*, 2015) et la protection des données (Richter & Slowinski, 2019).

Cependant, ce secteur nécessite encore des améliorations, qui ne seront pas intégrées dans nos travaux de gestion du partage de ressources (hors cadre de la thèse de doctorat), même si ceux-ci peuvent bien sur impacter la solution proposée.

2.3.3. Approche comportementale

La littérature sur l'approche comportementale du partage de ressources s'est concentrée sur les déterminants et les résultats de la participation des acteurs, ainsi que leurs relations et

interactions. Les avantages économiques (économiser du temps et de l'argent) ont une influence significative sur l'intention comportementale dans l'économie de partage (Hamari *et al.*, 2016). Les sections suivantes du document traitent des principaux outils et aspects théoriques de l'étude sur l'approche comportementale.

2.3.3.1. Théorie des jeux

La théorie des jeux est un ensemble d'outils d'analyse des interactions stratégiques entre les acteurs. La théorie des jeux permet de représenter le comportement d'agents économiques engagés dans une action compétitive. De plus, la théorie des jeux permet de comprendre comment les acteurs (joueurs) interagissent dans un processus de prise de décision de mutualisation. Ces joueurs s'efforcent de maximiser leurs propres objectifs malgré le choix d'une stratégie commune.

De très bonnes études sur la théorie des jeux existent dans les applications d'optimisation du partage de ressources de fabrication pour des entreprises qui produisent ensemble. Ainsi, dans (Hennet & Mahjoub, 2010), les auteurs proposent de renforcer la stabilité de la coalition en sélectionnant un ensemble minimal d'entreprises partenaires (ces entreprises doivent devenir partenaire de leurs concurrents ou éviter les associations avec leurs concurrents) afin d'obtenir le profit maximum attendu et de garantir l'équité pour les entreprises membres. Dans sa thèse, Chi (Chi, 2021) a divisé l'étude de l'économie de partage en quatre perspectives : les consommateurs, les fournisseurs, les modèles commerciaux et la politique de protection des données personnelles. Un jeu d'économie en deux étapes à l'aide de modèles de la théorie des jeux examine la concurrence et les comportements associés à l'économie de partage pour révéler comment les consommateurs s'engagent dans le partage.

Les jeux peuvent être coopératifs ou non coopératifs. L'approche coopérative vise à prédire la prise de décision collective avec une phase de négociation entre des joueurs. D'autre part, l'approche non coopérative est surtout utilisée pour les joueurs qui sont totalement libres de prendre leurs propres décisions. Par exemple, Hennet et Mahjoub ont défini un jeu coopératif pour étudier la conception des entreprises avec une mise en commun parfaite des ressources industrielles (Hennet & Mahjoub, 2010). En ce sens, les fournisseurs et les clients peuvent être modélisés comme une collaboration entre les joueurs. Ce modèle présente alors des avantages pratiques puisqu'il persuade les fournisseurs et les clients de parvenir à un accord. Dans un autre travail, l'intérêt de la mise en commun des capacités entre des entreprises indépendantes en tenant compte des exigences de niveau de service est considéré (Yu *et al.*, 2015). Les auteurs

ont également modélisé leur problème avec un jeu coopératif et ont constaté que si les niveaux de service sont spécifiés en termes de temps d'attente au lieu du retard total, et lorsque les entreprises sont hétérogènes, la mise en commun de la capacité peut ne pas être bénéfique.

La théorie des jeux non coopératifs est une façon de modéliser et d'analyser des situations dans lesquelles chaque acteur ou entreprise doit prendre ses décisions indépendamment pour maximiser ses profits individuellement. Les jeux non coopératifs sont généralement modélisés par des équilibres de Nash (1951). Dans un jeu non coopératif, les joueurs choisissent leurs stratégies soit simultanément, soit séquentiellement (Maher *et al.*, 2021). La théorie des jeux coopératifs est utilisée pour déterminer un groupe d'acteurs avec leurs comportements et mettre en commun leurs gains et risques ce qui permet l'analyse des activités coopératives entre les joueurs afin d'obtenir un meilleur résultat. Les comportements coopératifs sont considérés comme des approches efficaces pendant le processus de la mutualisation (Hennet & Mahjoub, 2010). Quelques travaux basés sur la théorie des jeux sont résumés dans le tableau 2.1.

Tableau 2.1 Théorie des jeux appliqués au partage de ressources

Référence	Type de jeu	Description
(Yazan <i>et al.</i> , 2020)	Les jeux non coopératifs	Cet article développe un modèle de jeux non coopératifs utilisant les équilibres de Nash pour étudier les stratégies de coopération d'entreprises concurrentes et analyse comment une telle coopération peut mieux partager les coûts de l'entreprise en termes théoriques, managériaux et politiques.
(Gonzalez-Ramirez & Rodriguez-Gonzalez, 2021)	Les jeux non coopératifs	Cet article développe un modèle de jeux non coopératifs comme outil de prise de décision pour les avantages économiques de la durabilité. L'utilisation de cet outil de prise de décision peut aider les acteurs à trouver un équilibre entre l'environnement, la société et l'économie dans le cadre de leur coopération.
(Yang <i>et al.</i> , 2021)	Les jeux coopératifs	Cet article propose d'utiliser la théorie des jeux coopératifs pour trouver l'équilibre de l'allocation des bénéfices dans la coopération de la transformation d'automatisation dans les activités d'entreposage. Les résultats montrent que le bénéfice total maximum du nouveau modèle d'entreprise en

		partenariat est plus de deux fois supérieur à celui du modèle sans partenariat. Dans le même temps, grâce au système de partage des bénéfices du jeu coopératif, chaque partie du partenariat est en mesure de réaliser plus de bénéfices que dans le cas d'un partenariat indépendant.
(Zhao <i>et al.</i> , 2021)	Les jeux coopératifs	Cet article étudie les effets de différentes allocations de ressources et leurs impacts sur le développement d'alliances stratégiques. L'allocation des ressources est un processus décisionnel dynamique, et la théorie des jeux est utilisée pour révéler la stabilité et l'applicabilité de l'allocation des ressources et pour augmenter les bénéfices de l'entreprise par le biais de décisions stratégiques visant à choisir différents modèles d'allocation des ressources.
(Hafezalkotob <i>et al.</i> , 2022)	Les jeux coopératifs	Cet article développe une approche de la théorie des jeux coopératifs pour résoudre le problème d'allocation des ressources humaines afin d'atténuer les impacts négatifs d'événements catastrophiques, minimiser les niveaux de services hospitaliers normaux et réduire les dépenses indésirables.
(Faris <i>et al.</i> , 2022)	Les jeux coopératifs	Cet article présente une approche d'optimisation mathématique utilisant un jeu coopératif pour optimiser le processus du partage des ressources entre les exploitants de centrales. Les alliances coopératives peuvent réduire les émissions carbone et générer des bénéfices plus élevés que si les centrales électriques étaient exploitées indépendamment.

En conclusion, la théorie des jeux est un outil d'analyse mathématique qui permet d'étudier les stratégies comportementales de différents acteurs en présence de conflits d'intérêts. Elle est utilisée pour formaliser des situations complexes et identifier des équilibres stratégiques. Cependant, la théorie des jeux a également ses limites. Parfois, il est difficile d'appliquer la théorie des jeux, parce que les comportements humains sont souvent irrationnels et complexifiés par des facteurs sociaux, culturels, etc. En plus, elle ne peut pas prendre en compte tous les aspects d'une situation en pratique. Malgré tous ses défauts, la théorie des jeux est un

outil d'analyse des interactions stratégiques qui permet de décrire au mieux les objectifs visés par chacun des acteurs.

2.3.3.2. Système multi-agents

Un système multi-agents (SMA) est un système composé d'agents (ou acteurs) au sein d'un environnement et qui interagissent selon certaines règles pour atteindre un objectif donné. Trois types de SMA peuvent être définis : les systèmes d'agents cognitifs, les systèmes d'agents réactifs et les systèmes mixtes/hybrides. Un SMA peut être ouvert (les agents entrent et sortent librement) ou fermé (les mêmes agents du début à la fin), homogène (les mêmes agents) ou hétérogène (avec différents modèles) (Ferber, 1995 ; Ferber, 1999 ; Roy *et al.*, 2004). Les agents peuvent fonctionner de manière autonome dans un système collaboratif (Trentesaux *et al.*, 2017).

Un système multi-agents est un outil qui a souvent été utilisé pour centraliser l'information publique et intégrer le comportement des acteurs. Les systèmes multi-agents sont de plus en plus utilisés comme un outil pour analyser les problèmes de négociation et de coordination pour la prise de décision. Le SMA a la capacité de capturer, de modéliser et de prédire des caractéristiques dynamiques des comportements lorsque des acteurs sont en réseaux. Le SMA est particulièrement adapté aux domaines d'application modulaires, distribués, dynamiques et complexes. Le SMA permet des collaborations automatiques et dynamiques pour les systèmes aux comportements distribués et complexes (Parsons *et al.*, 2002 ; Lee & Kim, 2008 ; Ghadimi *et al.*, 2018). Quelques travaux basés sur les systèmes multi-agents sont résumés dans le tableau 2.2.

Tableau 2.2 *Systèmes multi-agents appliqués au partage de ressources*

Référence	Mot-clé	Description
(Aminzadegan <i>et al.</i> , 2019)	Allocation des ressources, Système multi-agents	Cet article propose un modèle multi-agents (notamment deux types d'agents comme les clients) pour minimiser la somme du coût de livraison, du coût de la pénalité de retard et du coût de la vente perdue lors de l'allocation des ressources de la chaîne logistique.
(Li & Zhang <i>et al.</i> , 2019)	Système multi-agents, Théorie des jeux	Cet article propose un cadre coopératif d'apprentissage par renforcement multi-agent pour résoudre le problème de l'équilibrage des ressources dans un réseau logistique complexe. Il introduit

		une collaboration innovante entre les agents de ressources et les mécanismes de récompense, ce qui se traduit par des transports plus efficaces et plus efficaces. En outre, cette approche multi-agents offre des améliorations significatives en termes de performance et de stabilité par rapport aux solutions traditionnelles d'optimisation combinatoire.
(Li <i>et al.</i> , 2019)	Blockchain, Système multi-agents	Cet article propose un système d'exploitation de flux de travail basé sur la blockchain pour remédier à la fragmentation des ressources. Les flux de travail basés sur des agents sont appliqués à la conception et au développement collaboratifs de produits, à la fabrication agile reconfigurable et aux flux de travail complexes. La fusion de la blockchain et des technologies basées sur les agents peut garantir la fiabilité des données et fournir des informations précises aux différents clients pour une meilleure prise de décision.
(Szaller <i>et al.</i> , 2020)	Partage de ressources de fabrication, Système multi-agents, Confiance	Cet article considère la confiance et la réputation comme des ressources de fabrication distribuées qui sont deux facteurs importants dans les décisions d'allocation. Les résultats expérimentaux de simulations multi-agents montrent que les modèles qui prennent en compte la confiance et la réputation dans la prise de décision sont plus performants en termes d'utilisation des ressources que les modèles basés uniquement sur des paramètres statiques d'évaluation des offres, ce qui peut améliorer les performances globales du système dans le cadre d'une fabrication avec partage des ressources.

Une approche comportementale basée sur l'utilisation de systèmes multi-agents couplée à la théorie des jeux permettrait de décrire au mieux le comportement des différents acteurs et d'analyser les interactions/liens entre acteurs. Après avoir étudié des travaux de systèmes multi-agents appliqués au partage de ressources, il pourrait être très intéressant de définir une stratégie qui permette d'identifier le fait que ces acteurs auront des besoins, des activités et des actions différents en fonction de leur comportement. Ces comportements pourraient être caractérisés par un système multi-agents. Les systèmes multi-agents peuvent donc résoudre des problèmes

complexes dans l'économie de partage. La simulation de la gestion de ressources communes du système multi-agents permet de modéliser le problème d'interaction entre des agents et des ressources dynamiques. Cependant, le système multi-agents a également ses limites. Par exemple, il est difficile de concevoir et de modéliser un comportement complexe dans la réalité, les résultats de simulation d'interactions sur les comportements en entreprise sont parfois imprévisibles, etc. Malgré tous ses défauts, les systèmes multi-agents peuvent être utiles dans l'économie de partage afin de simuler (ou prédire et aider à la décision, etc.) en se basant sur la modélisation comportementale des différents acteurs et d'analyser les interactions/liens entre eux pour le partage de ressources.

2.3.3.3. Autres approches

Certains auteurs estiment que des théories appliquées à l'économie de partage influencent le comportement sur les déterminants et les résultats de la participation des acteurs, cela nous amène à décrire d'autres outils et théories :

- La théorie du comportement planifié

La théorie du comportement planifié a été proposée par Icek Ajzen (1991), il s'agit d'une théorie psychologique sociale utilisée comme un moyen de prédire le comportement qui peut servir à identifier les déterminants de l'intention (Ajzen, 1991). Roos & Hahn (2019) ont mis en évidence l'applicabilité de la théorie du comportement planifié dans le contexte du comportement du consommateur. La théorie du comportement planifié est appliquée pour déterminer ce qui affecte l'intention des consommateurs du partage de services et le rôle crucial de la sensibilisation à l'économie de partage (Kim *et al.*, 2018).

- La théorie de l'échange social

La théorie de l'échange social peut prédire que les consommateurs dans l'économie de partage ont fait des choix basés sur une analyse subjective des coûts et des avantages. Cet outil permet d'identifier les acteurs qui motivent les consommateurs à partager (Tussyadiah 2016 ; Davlembayeva *et al.*, 2020). En s'appuyant sur la théorie de l'échange social et l'influence sociale, le prix et la confiance affectent le comportement de consommation durable des clients dans l'économie de partage (Lee *et al.*, 2018 ; Wang *et al.* 2019). Ces approches sont très axées client.

En conclusion, nous pouvons noter que l'approche organisationnelle implique de trouver une stratégie de choix d'organisation entre centralisation et décentralisation qui permet d'étudier l'influence des décisions prises sur le partage de ressources. L'approche législative/juridique permet d'avoir une vision globale pour la protection des consommateurs et la protection des données légales lors du partage de ressources. Les avantages économiques ont une influence significative sur l'intention comportementale des consommateurs (surtout sur les comportements intrinsèques de chaque acteur en fonction de leurs relations et interactions) dans l'économie de partage. L'approche comportementale permet de résoudre des problèmes complexes dans l'économie de partage, en particulier étudier les stratégies comportementales de différents acteurs sur les capacités, la motivation individuelle et les facteurs contextuels et sociaux, etc. Ces différentes approches peuvent nous aider à traiter le problème de partage de ressources chacune à une échelle différente. Dans la section suivante, nous présentons les principales innovations technologiques qui ont permis d'intégrer des nouveaux outils de communication dans le partage de ressources.

2.4. Innovations technologiques du partage de ressources

Avec la croissance de la technologie sur les dernières années, les plateformes numériques de partage se sont développées rapidement ce qui permet de réduire le risque de partage avec de parfaits inconnus grâce aux outils numériques de traçabilité et de transparence. Le partage des ressources devient ainsi un modèle d'affaires plus attrayant.

De plus, le terme "consommation collaborative", comme par exemple le pair-à-pair (en anglais peer-to-peer ou P2P) qui est une activité consistant à obtenir, donner ou partager l'accès à des biens et services, coordonnée par des services communautaires (en ligne pour le P2P) est le plus récent (Hamari *et al.*, 2016). D'autres études ont montré que les mesures de réputation ont un impact positif sur la confiance dans le choix des plateformes centralisées ou décentralisées. Sur les plateformes P2P décentralisées, les utilisateurs prennent généralement en compte les évaluations de réputation lorsqu'ils choisissent un prestataire de services. En revanche, les plateformes de partage centralisées ne recourent pas actuellement à des systèmes d'incitation importants, liant la rémunération aux performances, de sorte que les mesures de réputation ont un impact limité (Basili & Rossi, 2020). Dans le contexte de nouvelles technologies, des plateformes P2P telles que Uber et Airbnb permettent aux utilisateurs de partager leur accès privé aux ressources avec une large communauté (Frenken & Schor, 2017).

Le phénomène de l'économie de partage a révolutionné de nombreux secteurs : Uber, Lyft et Didi sont célèbres pour avoir introduit des innovations dans les secteurs des transports ; Airbnb est célèbre dans les secteurs de l'hôtellerie ; Wework est célèbre dans les secteurs des bureaux (Klarin & Suseno, 2021). L'économie de partage est l'une des formes les plus représentatives d'un écosystème de services en tant qu'idée nouvelle issue de la technologie mobile. Einav et ses collaborateurs ont fourni un modèle théorique de plateforme de partage de P2P qui illustre comment certains fournisseurs de biens ou de services traditionnels peuvent permettre à des petits fournisseurs ou à des fournisseurs flexibles d'entrer sur le marché (Einav *et al.*, 2016). De plus, les recherches de Cortade et Poudou ont montré qu'un nouveau modèle d'échange de plateforme P2P dans le secteur de l'électricité peut inciter efficacement à l'investissement dans les énergies renouvelables, et ainsi permettent de conduire à des résultats économiques souhaitables pour une communauté (Cortade & Poudou, 2022). Frenken et Schor observent que, plus les gens participent à des plateformes pour des raisons économiques, plus l'interaction sociale diminue (Frenken & Schor, 2017). Ils suggèrent que la confiance soit codifiée dans l'utilisation de notations et de réputations de utilisateurs. En outre, dans sa thèse, Abadie a défini un modèle théorique de l'approche d'économie organisationnelle dans une plateforme numérique du partage (Abadie, 2021). L'intérêt de combiner des approches de sciences économiques et de gestion est de proposer de théoriser l'ensemble d'un écosystème de plateforme et un canevas normatif du modèle d'affaires de plateforme.

Dans la section suivante, nous présentons l'impact de la révolution numérique dans le partage de ressources.

2.4.1. Numérisation du partage

Au cours de ces vingt dernières années, l'évolution des produits vers des appareils intelligents et connectés a révolutionné l'entreprise. Les nouvelles capacités et les grandes quantités de données fournies par les logiciels et les systèmes d'exploitation basés sur le cloud et l'intelligence des produits connectés redéfinissent l'activité des fonctions commerciales essentielles et contribuent à rendre les personnes, les matériaux, l'énergie, les installations et les équipements beaucoup plus productifs (Porter & Heppelmann, 2015).

Le cloud computing est la fourniture de services informatiques via les technologies Internet. Il y a trois types de modèles de services informatique qui sont proposés en cloud computing : Infrastructure as a Service (IaaS), Platform as a Service (PaaS) et Software as a Service (SaaS)

(Armbrust *et al.*, 2010). Le Cloud Manufacturing (Xu, 2012 ; Tao *et al.*, 2018) est un nouveau concept très utilisé dans le cadre des petites et moyennes entreprises (PME) dans le développement d'activités industrielles et commerciales. L'objectif du Cloud Manufacturing est de fournir des services de fabrication à la demande aux consommateurs via le cloud computing. La transformation numérique par des services en cloud et la virtualisation des ressources permettent la transformation numérique de la fabrication et la prise de décision intelligente (Trentesaux *et al.*, 2019).

Les différentes activités collaboratives sont ainsi facilitées par les outils et méthodes de l'industrie 4.0. Cela permet de plus de développer de nouvelles stratégies permettant d'intégrer le concept de développement durable tout en assurant la création de nouveaux modèles d'affaires et de services. En effet, depuis quelques années, grâce aux évolutions significatives des technologies (comme les technologies RFID, NFC, les nouvelles adresses Ipv6, la géolocalisation, etc.), la croissance des développements autour d'objets connectés explose (Atzori *et al.*, 2010).

L'industrie 4.0 est considérée comme une nouvelle étape industrielle et une révolution axée sur la technologie pour atteindre une efficacité et une productivité accrues (Alejandro *et al.*, 2019 ; Xu *et al.*, 2021). Elle repose sur de nombreuses technologies (L'Internet des objets (IoT), CPS, Big Data, l'intelligence artificielle (IA), Blockchain, Cloud computing, Cloud Manufacturing, Réalité augmentée, etc.) qui peuvent rétablir la confiance du marché des échanges de services sur les plateformes numériques du partage, ce qui permet de bouleverser l'économie de partage. Cependant, la singularité de nombreuses applications industrielles exige de combiner l'ingéniosité de l'expertise humaine avec des machines efficaces, intelligentes et précises, afin d'obtenir des solutions fiables (Rajput & Singh, 2019).

Plus récemment, la commission européenne a lancé une approche complémentaire à l'industrie 4.0, appelée industrie 5.0. L'industrie 5.0 est considérée comme l'avenir de l'industrie et se caractérise par le fait qu'elle est axée sur la valeur plutôt que sur la technologie comme l'industrie 4.0 (Xu *et al.*, 2021 ; Maddikunta *et al.*, 2022). Les outils numériques de l'industrie 4.0 sont inscrits pleinement dans l'industrie 5.0.

En parallèle, le développement des stratégies de mutualisation crée de nouvelles opportunités pour l'industrie qui permettent de maximiser l'utilisation des ressources (Rouquet & Vauché, 2015). Les avantages se traduisent principalement par l'optimisation de l'allocation et de la circulation des ressources, la réduction des gaspillages de ressources et la réalisation

des bénéfiques pour toutes les parties prenantes. Depuis, le partage s'est largement développé, de la forme la plus simple (partage d'une ressource commune telle que le transport) à la plus complexe (partage de services de nature différente pour répondre aux besoins divers d'un réseau d'acteurs).

Le terme "intelligence artificielle" (IA) créé par John McCarthy en 1956 peut se définir comme l'ensemble de théories et des techniques mises en œuvre en vue de réaliser des machines capables de simuler l'intelligence humaine (Andresen, 2002). L'IA englobe le "Machine Learning" (ML), et le "Deep Learning" (DL) (Janiesch *et al.*, 2021). L'industrie 5.0 est souvent considérée comme l'extension de l'industrie 4.0 vers l'adoption de technologies avancées d'IA pour l'automatisation industrielle et la collaboration homme-robot pour accroître la durabilité (Demir *et al.*, 2019). Parmi tous les projets, le partage des ressources a trouvé un nouveau souffle avec l'aide des plates-formes de cloud computing où Internet apporte une valeur ajoutée (Daxhammer *et al.*, 2019). Le déplacement de la source de profit des produits vers les services a transformé les fabricants de produits en fournisseurs de produits et services industriels. Cependant, nous constatons que souvent la création de valeur offerte par un service nécessite un système logiciel capable d'analyser des données provenant de différentes sources telles que : des appareils, des machines, des postes de travail, des robots, des cobots et d'autres objets qui sont équipés de capteurs et d'actionneurs.

Dans ce qui suit, nous présentons plus en détail la notion de ressources connectées.

2.4.2. Ressources connectées

Depuis quelques années, grâce aux évolutions significatives des technologies, la croissance des développements sur l'IoT explose : Selon une analyse de CISCO, les appareils IoT représenteront 50 % (14,7 milliards) de tous les appareils en réseau dans le monde et plus de 70 % de la population mondiale (5,7 milliards) disposera d'une connectivité mobile d'ici à 2023 (CISCO, 2020). L'IoT introduit par Kevin Ashton en 1998 représente le fait que les objets sont connectés au réseau Internet. Les ressources sont connectées via un réseau qui supporte la même architecture, et les ressources (ou objets) connectées peuvent interagir avec elles-mêmes et/ou des ressources humaines (Khan *et al.*, 2019). Généralement, le réseau est connecté à une base de données classique et à un cloud, les flux étant suivis à l'aide de RFID, de systèmes codes-barres ou GPS (Global Positioning System) ou des technologies de repérage intérieur (Biswal *et al.*, 2018). Dans ce dernier cas, plusieurs utilisations des IoT sont possibles, comme pour des

applications générales, comme la mutualisation des activités de transport et d'entreposage entre plusieurs entreprises (Liu *et al.*, 2020) ou la réalisation collaborative de tâches industrielles à l'aide d'IoT industriels dans le cas de la fabrication intelligente.

En raison du développement rapide des réseaux d'objets connectés, les services au sein de l'environnement de fabrication deviennent de plus en plus intégrés, ce qui permet de transformer les échanges et les affaires, et de faciliter la mise en œuvre de l'industrie 4.0 (Muhuri *et al.*, 2019). Cependant, parallèlement à cette explosion des applications et usages possibles, de nombreux défis découlant de la mise en œuvre, de l'interopérabilité et de la maintenance sont encore à l'étude (Zdravković *et al.*, 2018). Différentes difficultés apparaissent concernant la sécurité/accès/intégrité des données en raison de la faiblesse de ces réseaux de capteurs sans fil (Khan & Salah, 2018).

Un IoT industriel (ou en anglais Industrial Internet of Things - IIoT) pourrait être défini comme un : "*network of intelligent and highly connected industrial components that are deployed to achieve high production rate with reduced operational costs through real-time monitoring, efficient management and controlling of industrial processes, assets and operational time*" (Khan *et al.*, 2019). En ce sens, les IIoT offrent un large champ d'amélioration et d'efficacité dans les tâches opérationnelles (dans le pilotage, le suivi, la maintenance, l'interopérabilité...) mais aussi en termes de réactivité et de flexibilité face aux changements et aux incertitudes. L'IIoT correspond à toutes sortes d'éléments qui travaillent de manière collaborative pour accomplir des tâches prédéfinies (Li *et al.*, 2020).

Cependant, contrairement aux IoT, qui sont davantage dédiés à un usage grand public, les IIoT doivent offrir une réelle valeur ajoutée afin que l'investissement nécessaire à leur déploiement soit rentabilisé. À ce titre, ils doivent être en mesure d'offrir de réelles avancées pour les entreprises, telles que la collecte et l'analyse de données en temps réel, des gains d'efficacité et une meilleure traçabilité. Comme exemples d'IIoT, nous pouvons citer le modèle d'architecture de référence Industrie 4.0 qui est composé de 6 niveaux nommés Business, Fonctionnel, Information, Communication, Intégration et Asset (Adolphs & Epple, 2015). Ce modèle est orienté services et permet de développer de multiples activités pour le même "hardware" comme la planification, la surveillance, la maintenance, la gestion des données pendant le cycle de vie complet du produit. L'architecture de référence de l'Internet industriel proposée dans (Lin *et al.*, 2017) a seulement 4 niveaux : Business, Usage, Fonctionnel et Mise

en œuvre. Enfin, le modèle de référence de l’IoT (Bauer *et al.*, 2013) définit les concepts de base, les modèles, la terminologie et les relations dans le modèle de référence architectural de l’IoT.

En ce qui concerne les IoTs, l’architecture la plus développée à l’heure actuelle reste l’architecture centralisée, largement utilisée pour les IoTs domestiques mais aussi par les entreprises (Alli & Alam, 2020). Nous comparons dans le tableau 2.3 suivant certains travaux publiés dans la référence architecturale IoT citée dans ce document.

Tableau 2.3 Comparaison entre 3 architectures IoT

Critiques	Technologie	Logiciel
Khan <i>et al.</i> , 2019	IoT, Cloud computing, Edge system, Big data analytics	Serveurs en Cloud
Zdravković <i>et al.</i> , 2018	IoT, MAS, Ingénierie des systèmes à base de modèles	UML/SysML
Liu <i>et al.</i> , 2019	Blockchain, AI, Big data analytics, MAS	Cloud system XML/JSON, Service Web RESTful

Toutefois, l’absence de politiques publiques, de normes et de mesures réglementaires concernant le développement d’IoT sûrs et efficaces constitue un obstacle à la fiabilité, mais aussi à la connectivité et à l’interopérabilité totales. Parallèlement, les risques liés à la mise en œuvre de l’IoT augmentent lorsque d’importantes mesures techniques et organisationnelles sont exigées par les entreprises dans le cadre de la directive sur l’industrie et les services 5.0. En outre les données personnelles des utilisateurs ne peuvent être garanties. Quoi qu’il en soit, il faut tenir compte des questions de sécurité et de confidentialité pour sécuriser les applications IoT. C’est la raison pour laquelle il est nécessaire de coupler l’IoT avec d’autres technologies pour assurer la sécurité et la confidentialité individuelle des éléments (Caron *et al.*, 2016), car nous avons de nombreuses entités différentes et indépendantes dans l’IoT, telles que les appareils, passerelles, utilisateurs, etc. À ce titre, nous pouvons citer les blockchains. Une blockchain est une base de données décentralisée, distribuée, partagée et immuable qui permet de stocker l’historique des transactions (Murray, 2016). Les réseaux blockchain sont des bases de données qui permettent d’assurer la robustesse. Elles comportent des chaînes de blocs de données validées et horodatées pour assurer la sécurité. Le plus important est que les blocs de données sont

immuables pour fournir un historique des actions. Donc l'IoT combiné avec la blockchain pourrait être très intéressant. En ce sens, l'introduction des blockchains est intéressante, mais il n'est pas simple d'intégrer la blockchain avec l'IoT (Tseng *et al.*, 2020).

La technologie des blockchains a été définie en 2009 pour la monnaie numérique bitcoin. Cette technologie a depuis rencontré de nombreux intérêts du fait de son caractère décentralisé et de sa transparence très prometteuse. Le principe est décrit dans la figure 2.1. La blockchain est une liste complète de tous les blocs de transactions complétées. Le premier bloc de transaction de la blockchain est appelé « Bloc Genesis », c'est le seul bloc de la chaîne à ne pas posséder de valeur de hachage du bloc précédent. Pour générer un nouveau bloc, il nous faut connaître la valeur de hachage du bloc précédent (Liu *et al.*, 2019b).

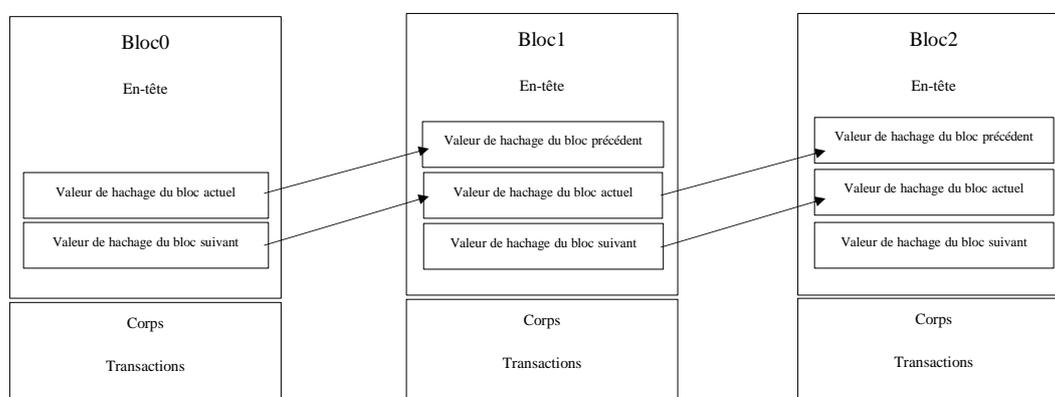


Figure 2.1 Structure de la blockchain

La base de données décentralisée enchaîne des blocs de données qui sont validés par des « mineurs » et les enregistre de manière cryptographiée pour assurer une authentification et une intégrité des données. Ainsi, chaque transaction émise est vérifiée et validée par consensus des mineurs. Les données des blocs sont donc immuables : les données ne peuvent jamais être modifiées ou effacées. Si une erreur ou une modification apparaît, une nouvelle transaction (un nouveau bloc) est ajoutée pour amender le bloc concerné (qui lui ne change pas). La principale contribution des blockchains est de générer la sécurité nécessaire pour automatiser les phases déclaratives sans avoir recours à un tiers. En outre, en cas d'attaque, l'algorithme de cryptage défini permet de protéger également les utilisateurs.

Il existe différents réseaux de blockchain, et la plupart d'entre eux sont open source. La comparaison a révélé que la plupart des réseaux de blockchain peuvent offrir différents modes de fonctionnement d'utilisation (publique, privée et consortium) et toutes les données et informations peuvent être partagées de manière décentralisée. La plus populaire des

blockchains est Ethereum (ou Hyperledger), il existe de nombreux travaux de recherche développés en utilisant un des deux réseaux de blockchain (Ethereum et Hyperledger).

Les plateformes numériques basés sur l'IoT et les blockchains associées au contexte du partage de ressources est un phénomène de plus en plus traité, voir le tableau 2.4.

Tableau 2.4 Plateforme numérique au partage de ressources

Référence	Outils/Méthodes	Domaine	Objectifs de recherche
(Cao <i>et al.</i> , 2021)	Cloud manufacturing, Théorie des jeux	Ressources de fabrication	Cet article examine trois stratégies de partage des ressources manufacturières : le partage indépendant, le partage sous forme d'alliances et le partage en partenariat avec des opérateurs. Les résultats d'équilibre obtenus à l'aide de la théorie des jeux pour comparer ces trois stratégies montrent que lorsque les fournisseurs partagent sous la forme d'alliances, les participants reçoivent des bénéfices de système inférieurs. Ces résultats permettent aux fournisseurs de choisir des stratégies appropriées de partage des ressources dans le Cloud Manufacturing.
(Li <i>et al.</i> , 2021)	Blockchain, Digital twin	Connaissances partagées	Cet article propose une plateforme de partage de jumeaux numériques basée sur la blockchain pour permettre la protection du partage des droits d'auteur des logiciels et simplifier l'intégration de ressources de fabrication hétérogènes dans des environnements décentralisés et distribués. La numérisation des ressources physiques permet d'accéder à un grand nombre de ressources de fabrication inutilisées sur la plateforme partagée de fabrication en cloud et l'augmentation de l'efficacité de la production.
(Rong & Sun <i>et al.</i> , 2021)	Appariement (Matching)	Plateforme d'économie de partage	Cet article étudie le problème de l'appariement en tant que service dans l'économie de partage. En établissant un modèle de théorie des jeux et en développant un

			mécanisme spécifique de traitement de l'information dans la plateforme de l'économie de partage, le temps de réponse du service est amélioré, les coûts de transaction sont réduits et le niveau de service de la chaîne d'approvisionnement est amélioré.
(Yu & Jiang <i>et al.</i> , 2020)	Blockchain, Systèmes cyber-physiques	Ressources de fabrication	Cet article propose l'intégration de la blockchain dans les systèmes de fabrication partagés afin de résoudre le problème de confiance du partage des ressources dans l'industrie manufacturière. L'utilisation de la technologie blockchain permet d'assurer la transparence et la traçabilité des données dans le processus de partage des ressources. Cela peut être une solution pour résoudre le problème de confiance du partage des ressources d'un point de vue technique.

En conclusion la technologie IoT permet aux objets de se connecter et d'échanger des données, ce qui se traduit par une amélioration de l'efficacité, des avantages économiques, une réduction de l'intervention humaine et des interactions possibles entre objets connectés et/ou l'humain et donc des interactions (échange et analyse d'informations) entre l'Homme et la machine. Mais dans ce cas, une problématique liée à l'échange de données apparaît. Les blockchains peuvent donc être intéressantes pour résoudre de nombreux problèmes et défis liés à ces développements dans le cadre d'activités des ressources partagées ou mutualisées. Dans le cadre des industries 4.0 et 5.0, cela permet d'agir dans un contexte de développement durable en facilitant l'optimisation de l'utilisation des ressources industrielles connectées, en réduisant la consommation d'énergie et de matières et en récupérant un maximum d'informations facilitant la prise de décision.

2.5. Conclusion

Suite à la révolution technologique des technologies de l'information, cela nous amène à proposer un renouveau des pratiques du partage des ressources dans le contexte de nouvelles

technologies émergentes. Dans ce chapitre, nous avons identifié les caractéristiques du partage de ressources dans le contexte de l'économie de partage.

Pour nous aider à traiter le problème de partage de ressources, nous avons présenté une synthèse de perspectives des ressources partagées avec les différentes approches. L'évaluation du partage de ressources numérique est très importante suite à la révolution des technologies de l'information et de la communication. En effet, cette évolution permet de développer de nouvelles stratégies et méthodes en assurant la création de nouveaux modèles d'entreprise et de services telles que les plateformes numériques de partage. Bien sûr, chacune des ressources peut avoir des caractéristiques spécifiques (comme l'immatérialité pour les services, les habitudes pour les humains ou la présence pour les biens physiques) qui doivent être prises en compte et augmentent la difficulté à gérer les partages associés.

Cependant, l'intérêt principal du partage est principalement le profit économique, mais il permet aussi de réduire la consommation de ressources et la pollution environnementale induite, et de maximiser les bénéfices sociaux. Le second intérêt provient du développement des technologies de l'information (John, 2013), y compris les logiciels libres, les échanges entre pairs et les réseaux sociaux, qui fournissent de nouvelles plateformes pour supporter le partage de ressources à grande échelle (cloud, partage de mémoire/fichiers entre pairs, etc.), voir par exemple les travaux de recherche développés concernant les enjeux et opportunités pour l'économie de partage durable (Eloranta & Turunen, 2015; Curtis & Mont, 2020).

Parmi les différentes évolutions du partage de ressources, il est nécessaire de proposer des nouvelles stratégies et méthodes et/ou d'adapter d'anciennes au contexte actuel. Tels que décrits précédemment, les outils et les méthodes ont également des limites et défauts. Nous avons étudié les outils et les méthodes existants qui permettent d'adapter l'économie de partage aux outils de numérisation et de la technologie de l'information des échanges et interactions. En conclusion ces travaux de recherche ont proposé une approche flexible de l'allocation des ressources dans le contexte de l'industrie 4.0. C'est pourquoi nous proposons une plateforme numérique à base de multi-agents, d'IoT et de blockchain pour le partage de ressources, intégrant la confiance à travers des expériences de système multi-agents pour améliorer la performance globale du système de partage des ressources.

Dans ce travail de thèse de doctorat, nous allons proposer des solutions pour résoudre nos problématiques. Tout d'abord, nous allons développer le partage de ressources industrielles

entre entreprises, ensuite nous allons proposer une architecture de plateforme numérique du partage de ressources industrielles connectées. Enfin nous allons proposer une application d'appariement au sein de la plateforme pour aider à l'allocation des ressources entre les offres et les besoins en partage de ressources.

Dans le chapitre suivant, nous détaillons le partage de ressources industrielles entre entreprises par une approche basée sur la théorie des jeux.

3. Gestion du partage de ressources industrielles entre entreprises

3.1. Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons posé les éléments caractérisant le partage de ressources ainsi que les principales approches permettant de faciliter, sécuriser et/ou optimiser celui-ci. Comme nous avons pu le remarquer, les outils issus de l'industrie 5.0 et les développements autour d'Internet ont permis de proposer de nouveaux modèles de partage de ressources, mais ils soulèvent également de nouvelles problématiques souvent liées à ces outils mais également aux acteurs les utilisant. En effet, le comportement des acteurs, l'organisation stratégique du partage et les objectifs visés vont impacter fortement la prise de décision. Quelles que soient les méthodes et outils retenus, l'échange et les interactions entre acteurs reste un point clé du partage de ressources. Il existe différentes possibilités de coopération et de prise des décisions relatives au partage des ressources (Gonzalez-Feliu & Morana, 2011 ; Liu *et al.*, 2019). Celles-ci peuvent se situer à différents niveaux :

- Au niveau stratégique :

Ce niveau de collaboration le plus élevé est lié à la conception du partage de ressources sur le long terme avec l'identification de toutes les stratégies possibles des acteurs, le choix du modèle commercial à proposer ainsi que les ressources à partager. Les décisions prises à ce niveau permettront de savoir pourquoi et quand définir le partage de ressources, ainsi que les ressources potentiellement partagées.

- Au niveau tactique :

Le niveau de collaboration à moyen terme implique plusieurs décisions telles que le nombre d'entreprises qui participent au partage, les prévisions de demande en ressources et les disponibilités des ressources fournies, etc. À ce niveau, le partage des décisions peut établir une relation de confiance entre les collaborateurs (Gonzalez-Feliu & Morana, 2011). Ce niveau permettra de définir comment organiser le partage de ressources.

- Au niveau opérationnel :

Ce niveau de collaboration est lié à des opérations quotidiennes du partage de ressources. À ce niveau, nous devons contrôler, planifier et surveiller l'utilisation réelle de chaque ressource. Ce dernier niveau permettra de mettre en place le partage de ressources.

Ce chapitre s'intéresse plus particulièrement au niveau tactique, le niveau opérationnel étant présenté dans la suite de ce mémoire (cf. chapitres 4 et 5). Il est à noter que nous nous intéressons à une approche purement économique pour mettre en avant l'intérêt économique d'un partage de ressources entre entreprises.

Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous présentons ce qu'est le partage de ressources industrielles. Dans la troisième partie, nous proposons le modèle basé sur la théorie des jeux permettant d'étudier les comportements des acteurs. Dans la quatrième partie, nous donnerons un exemple d'application du partage de ressources industrielles : la mutualisation logistique dans les entrepôts et l'application de la théorie des jeux dans ce cas.

3.2. Partage de ressources industrielles

3.2.1. Principe du partage numérique entre entreprises

Le principe du partage entre entreprise permet à celles-ci de collaborer et mutualiser certaines ressources peu ou pas utilisées afin de réduire les coûts et améliorer le taux d'utilisation. En effet, le partage de ressources permet, d'une part, la maximisation du gain des entreprises partenaires et la minimisation du risque vis-à-vis de la concurrence, et d'autre part, il peut permettre d'agir sur l'empreinte écologique des entreprises par la mise en commun d'une ressource et donc la réduction de moyens. La mutualisation peut être un mode d'organisation des entreprises qui représente une solution performante pour améliorer les différents axes en termes de développement durable pour la réduction des impacts environnementaux et l'amélioration des services aux clients (Rakotonarivo *et al.*, 2009). Il est à noter que le partage de ressources peut s'effectuer à travers des collaborations entre des entreprises concurrentes ou potentiellement concurrentes ou liées (groupement, association, joint-venture, etc.). Ce type de relations interentreprises peut être étudié selon différentes approches comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent.

Dans la section suivante, nous présentons les paramètres clés de la prise de décisions qui peuvent influencer le processus de la prise de décision du partage de ressources entre entreprises.

3.2.2. Paramètres clés pour la mise en place d'un partage entre entreprises

Les éléments importants dans le cadre d'un partage, que celui-ci soit entre entreprises ou non, sont :

- *La confiance*

La confiance est une condition préalable au partage des ressources de l'entreprise, la confiance permet de construire la relation entre entreprises. Les transactions de partage doivent être transparentes et doivent permettre d'établir et maintenir la confiance lors du partage.

- *La communication des informations*

La communication des informations est essentielle afin de remonter toutes les informations (acteurs, ressources, utilisations, etc.). Ces informations permettent de garantir une approche plus sûre (et donc une décision durable sur le long terme).

- *Le partage de risques*

Le partage de ressources entre entreprises permet de minimiser les risques globaux (les risques de dépendance, les risques d'incidents, les risques importants de cyberattaques et de problèmes de sécurité des données, etc.). Ces risques doivent être soigneusement pris en compte avant la mise en commun des ressources afin de trouver une solution optimale (comme les risques liés à la sécurisation des données).

- *Le partage des gains*

Le partage de ressources entre entreprises permet d'augmenter les gains globaux (la réduction des coûts d'utilisation de ressources, les gains de productivité et les gains environnementaux, etc.). Il s'agit de la première motivation de la mise en commun de ressources. C'est donc un paramètre clé important.

Il est important de considérer ces différents paramètres lors de la définition du partage de ressources. L'utilisation des nouveaux outils de communication et de collaboration peuvent donc être d'une aide non négligeable dans le cadre de la mutualisation des ressources afin d'optimiser le fonctionnement global et faciliter la prise de décision du partage.

En outre, choisir le bon modèle commercial est une stratégie commerciale de l'entreprise qui permet d'avoir une meilleure solution pour mettre en place le partage numérique. Les plateformes numériques de l'économie de partage P2P ou de consommateur à consommateur (C2C), comme Uber et Airbnb qui permettent aux particuliers de partager facilement pour générer des revenus supplémentaires tout en conservant la propriété, maximisent ainsi la valeur des actifs. Il existe également des entreprises utilisant des plateformes de partage qui fonctionnent sur un modèle de partage de l'entreprise à des consommateurs (B2C) sur le marché pour proposer leurs propres produits et les rendre facilement accessibles aux clients finaux. Au cours des dernières années, après avoir permis aux particuliers de partager des biens, des services ou des informations, nous assistons à la croissance rapide du partage de ressources industrielles d'entreprise à entreprise (Bian *et al.*, 2021). Ces trois modèles sont des modèles commerciaux largement adoptés dans la pratique.

Dans ce travail, nous nous intéressons au modèle B2B de partage de ressources industrielles d'entreprise(s) à entreprise(s). Avant de comprendre le processus de la prise de décision pour le partage de ressources industrielles d'entreprises, nous devons savoir quels sont éléments clés pour les entreprises et les marchés.

Il est à noter également que les différentes visions (coté fournisseur ou coté client) peuvent influencer le processus de prise de décision du partage de ressources, plus précisément :

- Vision fournisseur :

La vision fournisseur est un objectif de maximisation du gain côté de fournisseurs avec la minimisation des risques lors de la mise en commun des ressources.

- Vision clients :

La vision clients a pour un objectif de maximiser le gain côté des clients et minimiser les risques relativement aux besoins des clients demandeurs de ressources.

- Vision fournisseur et clients (bi-objectif) :

La vision fournisseur et clients est une optimisation bi-objective. Dans cette vision bi-objectif, il faut trouver un modèle permettant d'équilibrer les deux côtés des fournisseurs et des clients pour maximiser le gain global.

Ces différentes visions vont bien évidemment impacter les résultats obtenus, car le rôle des acteurs est différent mais le comportement de ceux-ci va également fortement impacter le partage de ressources industrielles. Il peut donc être intéressant d'intégrer ce comportement au sein des méthodes proposées pour améliorer le processus de partage de ressources. C'est pourquoi, dans la section suivante, nous allons étudier plus précisément ces acteurs en proposant un modèle mathématique basé sur la théorie des jeux pour comprendre comment les acteurs (joueurs) interagissent dans un processus de prise de décision de la mutualisation. Ce modèle nous permettra d'identifier toutes les stratégies possibles des acteurs qui participent ou non au partage des ressources.

3.3. Étude des comportements par la théorie des jeux

3.3.1. Principe et choix du modèle

Comme nous l'avons vu, la théorie des jeux permet de comprendre comment les acteurs (joueurs) interagissent dans un processus de prise de décision dans le cadre d'un échange/partage. Ces joueurs s'efforcent de maximiser leurs propres objectifs malgré le choix d'une stratégie commune. Du point de vue économique, l'idée principale est de représenter le comportement des acteurs dans un environnement économique pour analyser les interactions résultant de ces comportements.

Dans ce travail, nous considérerons des jeux coopératifs qui nous permettront de représenter la mise en partage comme un ensemble de coalitions entre plusieurs joueurs. L'hypothèse est que les entreprises (le fournisseur et ses clients) peuvent choisir des stratégies différentes (participer à la mise en commun ou ne pas participer à la mise en commun). Ces entreprises partageront le gain et le risque global aux différents niveaux dans un cadre contractuel bilatéral, afin de permettre de mieux répondre aux besoins des clients.

3.3.2. Modèle

Dans ce qui suit, nous présentons un premier modèle permettant de mettre en avant le cas de deux entreprises concurrentes se partageant un même marché avec 2 stratégies possibles (voir dans le tableau 3.1) :

- Choix 1 : participer à une stratégie de mise en commun (C), lors de la distribution de leurs produits finis avec un risque plus important ($Riskmax$) de voir perdre des informations cruciales (caractéristiques/besoins du client, délai de livraison, etc.) mais des coûts de distribution plus faibles ($Cdmin$).
- Choix 2 : ne pas participer à une stratégie de mise en commun (NC), lors de la distribution de leurs produits finis avec moins de risque ($Riskmin$) de perdre des données cruciales mais des coûts de distribution plus élevés ($Cdmax$).

Cela correspond au dilemme du prisonnier défini dans les travaux de Robert Axelrod (Axelrod, 1984). Le dilemme du prisonnier incarne l'idée que l'agrégation des préférences individuelles ne conduit pas nécessairement à un optimum collectif.

Tableau 3.1 Modèle de deux entreprises compétitives sous la forme d'une matrice des gains et des risques

		Entreprise B	
		Participer à la mise en commun (C)	Ne pas participer à la mise en commun (NC)
Entreprise A	Participer à la mise en commun (C)	$CdAmin / CdBmin$ $RiskAmax / RiskBmax$	$CdAmin / CdBmax$ $RiskAmax / RiskBmin$
	Ne pas participer à la mise en commun (NC)	$CdAmax / CdBmin$ $RiskAmin / RiskBmax$	$CdAmax / CdBmax$ $RiskAmin / RiskBmin$

Les paramètres et variables sont données par :

$Cdmax$	Coût de distribution plus élevé de l'entreprise
$Cdmin$	Coût de distribution plus faible de l'entreprise
$Riskmax$	Risques maximum pour l'entreprise
$Riskmin$	Risques minimum pour l'entreprise
N	Nombre total d'entreprises
k	Période k

$N^+(k)$	Nombre d'entreprises qui veulent participer à une mise en commun des ressources
$S(k)$	Nombre d'entreprises en fonction des besoins de ressources
$v(S(k))$	Gain global économique résultant de la mise en commun des ressources
$v_i(S(k))$	Part de gain économique à chaque période k , pour chaque entreprise i , avec i dans $N^+(k)$
$v^*(k)$	Gain maximal pour des entreprises $N^+(k)$ à chaque période k et leurs besoins (en termes de ressources et de services)

Nous considérons un nombre total de N entreprises. Ces entreprises peuvent participer (être actives) ou non (être passives) à la mise en commun. Plus précisément, à une période k , avec $k = 1$ à K (horizon temporel fini), un nombre donné d'entreprises $N^+(k)$ veulent participer à une mise en commun des ressources qui sera décrite comme des coalitions, générées en fonction des besoins des entreprises, notés $S(k)$, avec $N^+(k)$ un sous-ensemble de N . Dans ce cas, les $N^+(k)$ entreprises partageront le gain global, noté $v(S(k))$, correspondant aux gains économiques résultant de la mise en commun des ressources. Ainsi, à la suite de ce jeu coopératif, à chaque période k , chaque entreprise i , avec i dans $N^+(k)$ (le partage entre entreprises est matérialisé par un cadre contractuel bilatéral), obtiendra une part économique $v_i(S(k))$ supérieure à celle obtenue si i ne participe pas à la mise en commun, avec $\sum_i v_i(S(k)) = v(S(k))$.

Par exemple, supposons que deux entreprises manufacturières ont reçu de nouvelles commandes et sont prêtes à organiser leur production. L'entreprise A (EA) possède une machine $m1$ qui est utilisée pour la production 20 jours par mois et qui est libre le reste du mois, mais elle a besoin de la machine $m2$ 10 jours supplémentaires pour achever le processus de production. Le coût de machine $m1$ est 300 euros par jour pour EA . EA gagne 800 euros par jour. L'entreprise B (EB) dispose d'une machine $m2$ qui est utilisée pour la production 25 jours par mois et qui est libre le reste du mois ; elle a besoin de la machine $m1$ 5 jours supplémentaires par mois pour achever le processus de production. Le coût de machine $m2$ est 200 euros par jour pour EB . EB gagne 600 euros par jour.

L'hypothèse est que la période disponible de la machine $m1$ EA correspond à la période de besoin pour EB ; et la période disponible de la machine $m2$ EB correspond la période du besoin pour EA . Dans cet exemple, nous supposons que les deux entreprises doivent acheter des

machines pour compléter leurs fabrications si les deux entreprises choisissent de ne pas coopérer (*EA* doit acheter un type de machine m_2' identique à m_2 , et *EB* doit acheter un type de machine m_1' identique à m_1 pour achever le processus de production).

Nous donnons un exemple de profits obtenus (voir dans le tableau 3.2). Dans cet exemple, nous supposons que les valeurs sont prises en comptes dans les hypothèses concernant les coûts et les risques durant toute la période de partage.

Tableau 3.2 Exemple numérique de deux entreprises concurrentes sous la forme d'une matrice des profits lié au partage

Profits (euros)		Entreprise <i>EB</i>	
		C	NC
Entreprise <i>EA</i>	C	19,000 / 12,500	12,000 / 11,500
	NC	16,000 / 4,000	9,000 / 3,000

Dans ce jeu, deux joueurs/entreprises doivent choisir de coopérer ou de ne pas coopérer sans savoir ce que l'autre joueur a décidé. Le profit global lié au partage plus élevé (31,500 euros en total) ne peut être obtenu que si les deux joueurs coopèrent, mais de manière irrégulière, la décision de ne pas coopérer peut parfois être due à un manque de confiance ou des craintes liées aux risques, bien que cela aboutisse à une situation dans laquelle les deux joueurs ont quelque chose à perdre. En général, les deux cas (C / C) et (NC / NC) sont les choix stables. Si les joueurs sont tous les deux rationnels, le choix de jeu (C / C) devrait être raisonnable car le profit global est maximal.

Nous n'utilisons ici qu'un exemple simplifié, mais les situations réelles du partage entre entreprises peuvent être plus complexes. Cela nécessite la prise en compte d'un plus grand nombre de paramètres clés (cf. chapitre 3.2.2) telles que les stratégies contractuelles, la confiance, les relations concurrentielles, les risques, etc. Dans cet exemple, il faut également noter qu'un seul l'équilibre de Nash (C / C) est considéré (dans le tableau 3.2) qui permet d'avoir les profits globaux plus élevés. Cependant, il y a des limites dans ce jeu, les risques de participer à la mise en commun sont très difficile à mesurer en pratique. De plus, les tricheries de partage peuvent influencer la confiance sur la relation de partenariat entre les entreprises.

Dans un cadre plus général, notre problème peut être décrit en deux grandes étapes :

- Étape 1 - Niveau tactique

À ce niveau, connaissant le nombre d'entreprises $N^+(k)$ à chaque période k et leurs besoins (en termes de ressources et de services), l'entreprise pourra définir pour toutes les périodes (horizon fini) des allocations optimales de ressources et de services. À ce niveau, en fonction de l'allocation optimale pour chaque période k , le gain maximal est obtenu. Il est donné par $v^*(k) = \max_{S^j(k)} \sum_j v_j(S^j(k))$. Ainsi, à chaque période k , en fonction des contraintes de capacité et des besoins, l'entreprise pourra définir différents types d'allocations de ressources/services correspondant à différents types de partage (coalitions) notés $S^j(k)$ avec $0 \leq j \leq N$.

L'objectif du partage est alors de maximiser l'utilisation des ressources/services, c'est-à-dire maximiser la productivité et/ou l'utilisation totale des ressources (ou minimiser le temps total d'exécution des tâches, pour chaque ressource et service offert) à chaque période k , et aussi maximiser le profit économique (ou minimiser les coûts en considérant que lorsqu'une entreprise participe à une coalition, le prix d'utilisation sera inférieur à celui qu'elle paie lorsqu'elle ne participe pas à une coalition).

Ce problème bi-objectif est soumis à des contraintes de capacité du partage. Cependant, lorsque les clients et les fournisseurs ont des contrats spécifiques avec des entreprises correspondant à un partage, cela permet à ces fournisseurs de gagner plus d'argent et de mieux satisfaire ces clients particuliers. Dans la section suivante nous présentons le niveau opérationnel qui permet de contrôler, planifier et surveiller l'utilisation actuelle de chaque type de ressources.

- Étape 2 - Niveau opérationnel

Ce niveau nous permet de décrire l'utilisation courante des ressources et des services pendant une période k . Au niveau opérationnel. Les outils issus de l'industrie 5.0 comme les IoTs et les blockchains nous permettront de gérer plus simplement certaines activités comme par exemple la facturation (qui n'est pas traitée dans ce travail de thèse). Mais ces outils ne permettront pas d'aborder tous les problèmes liés aux comportements des acteurs durant la phase opérationnelle. La théorie des jeux pourrait nous aider à considérer des phénomènes de triches ou autres mais ne permettra pas facilement d'intégrer des modifications dynamiques. C'est pourquoi, ce niveau opérationnel sera géré par notre proposition de plateforme numérique de partage associant un système multi-agents aux

acteurs et ressources. Cette partie sera donc développée dans les chapitres suivants (cf. Chapitres 4 et 5).

Dans la section suivante, nous allons donner un exemple d'application de mutualisation logistique (partage de ressources industrielles connectées) entre entreprises.

3.4. Exemple d'application : mutualisation logistique

Dans cet exemple d'application, nous nous intéressons à la gestion sécurisée d'activités d'entreposage dans le cadre d'une mutualisation au sein d'un entrepôt partagé entre différentes entreprises. Plus précisément, nous nous intéressons à l'attribution de services et matériels logistiques.

Un entrepôt mutualisé est défini comme un entrepôt dont une partie ou la totalité est partagée entre plusieurs acteurs, qui peuvent être des fabricants, des prestataires logistiques et des sociétés de distribution, afin de partager des espaces physiques, des ressources et des informations logistiques pour améliorer les performances globales du processus d'approvisionnement et/ou de distribution (Makaci *et al.*, 2015). Les acteurs (même s'ils ne sont pas concurrents) sont plus intéressés par leur propre intérêt économique que par une stratégie de mise en commun optimale. Il serait donc intéressant d'identifier clairement toutes les stratégies possibles des acteurs (comment vont-ils agir pendant une période de mise en commun, honnêtement ou non ? Et s'ils trichent, comment ?) et sur la base de ces études de stratégies, de dimensionner la mise en commun pour obtenir les meilleures conditions possibles. En ce sens, les acteurs sont des agents économiques et intelligents (Pietarinen, 2004).

La solution n'est pas nouvelle, mais généralement, l'entrepôt est divisé en zones spécifiques et chaque occupant de ces zones (propriétaire et locataire) reste dans sa propre partie d'entrepôt, ce qui induit qu'un espace de stockage disponible ne peut être utilisé par un autre acteur. Même si le propriétaire propose aussi des services et/ou du matériel, il y a des soucis de refacturation, généralement résolus par des contrats au forfait. Ce que nous proposons ici est de développer une méthode permettant d'obtenir un partage d'entrepôt dynamique et sécurisé, où les factures seraient établies en tenant compte de l'utilisation réelle du service/ressource et où les emplacements de stockage disponibles seraient alloués de manière flottante en considérant l'entrepôt dans son ensemble et non comme une somme de zones distinctes. La principale difficulté réside dans le fait que les acteurs ont des caractéristiques et des besoins différents, ce

qui nécessite une bonne coordination entre eux et une utilisation optimale de l'entrepôt partagé. Il est donc nécessaire de définir un schéma global pour : i) gérer et sécuriser l'information en temps réel (y compris la confidentialité des données des entreprises) ; ii) gérer la complexité due à la présence de différents acteurs (y compris des acteurs concurrents) avec différents besoins ; iii) gérer les accès à tous les services possibles offerts dans l'entrepôt partagé.

Nous présentons un exemple d'entrepôt logistique mutualisé pour expliquer la mutualisation des ressources industrielles connectées dans ce cadre. Cet entrepôt logistique est défini comme un réseau d'objets connectés. Ces éléments logistiques étant identifiés par des étiquettes RFID ou barcode, QR code, etc.

En général, les entrepôts partagés sont gérés avec l'aide de prestataires logistiques de type 3PL (logistique en trois parties si collaboration bilatérale) ou 4PL (logistique en quatre parties si collaboration multilatérale). Le 4PL est une intégration plus poussée des ressources logistiques, telles que la gestion plus approfondie du cycle de d'approvisionnement et l'intégration de la technologie du système logistique basée sur 3PL (Hertz & Alfredsson, 2003 ; Vasiliauskas & Jakubauskas, 2007). De plus, le 4PL définit des liens plus fiables avec ses clients particuliers et donc permet d'obtenir un gain probablement plus important (Liu *et al.*, 2019). Cet exemple est développé avec l'aide de prestataires logistiques de type 4PL. Notre entrepôt partagé est constitué : de prestataires logistiques, de producteurs, de détaillants, de revendeurs, de clients en sortie de l'entrepôt (qui peuvent être les mêmes pour différents partenaires), d'espaces de stockage (stockages conventionnels et automatisés), de ressources humaines, du matériel (manutention, emballage, informatique, etc.), de différentes méthodes (règles, organisation, management) et de systèmes informatiques (ERP, WMS, CRM...). En entrée de l'entrepôt partagé arrivent des produits et en sortie des colis/palettes prêts à être affrétés, tous ces éléments étant identifiés par des étiquettes RFID (Liu *et al.*, 2018). Cet entrepôt est défini comme un réseau d'objets connectés. Les données globales de ce réseau sont centralisées par un prestataire logistique. Toutefois, ce réseau est soumis à de nombreux problèmes de sécurité. Il est donc nécessaire de proposer une stratégie sûre pour assurer la sécurité des données du réseau et celui des acteurs. De nouvelles solutions de logistiques sur des systèmes d'information des nouvelles technologies telles que la blockchain, l'IA ou encore IoT peuvent permettre de sécuriser des données dans l'entrepôt partagé.

Par conséquent, pour représenter mathématiquement notre problème, il est nécessaire de définir clairement les spécificités en termes de stockage et de service logistique pour toutes les entreprises considérées et pour chaque période de temps, et de dimensionner les coûts qui en découlent. Effectivement ces besoins sont provisoires et peuvent varier au cours du temps (l'horizon total de partage). Les notations sont les suivantes :

E_i	Entreprise
r	Ressource
k	Période k
$Sup(k)$	Surface totale de stockage de nombre maximal de palettes
$SCDup(k)$	Surface totale de stockage pour la zone de masse des marchandises
$Q^i(k)$	Quantité de marchandises pour i pendant k
$C_{storagesj}^i(S^j(k), Q^i(k))$	Coûts d'inventaire
$S^j(k)$	Coalition
$a_{Sj}^i(k)$	Coût fixe lié à la mise en œuvre de l'inventaire requis
$b_{Sj}^i(k)$	Coût variable lié à la mise en œuvre de l'inventaire requis
$\alpha_{mass}^i(k)$	Valeurs connues dans $[0, 1]$ dépendent du volume et de la masse des marchandises
$\alpha_{classical}^i(k)$	Valeurs connues dans $[0, 1]$ dépendant du volume des palettes
$L_{services}^i(k)$	Besoins en services logistiques
$T_{services}^i(k)$	Temps passé pour tous les services pendant k
$T_{services-sup}(k)$	Contrainte de capacité temporelle pendant k pour tous les services
$C_{logSj}^i(S^j(k), Q^i(k))$	Coûts des services logistiques
$v_{storage}$	Fonction d'utilité correspondant aux ressources de stockage
v_{log}	Fonction d'utilité correspondant aux services logistiques
$Max \pi_{Sj}^i(S^j(k), Q^i(k))$	Bénéfice total

Les besoins en termes de niveaux d'équipement et de leurs caractéristiques sont bien sûr variables en fonction des besoins des entreprises. Il est donc nécessaire de les caractériser à chaque début de période :

- Les zones de stockage peuvent être composées, par exemple, des étagères ou d'une zone de masse. Les entreprises exprimeront au 4PL leurs besoins spécifiques pour chaque période de temps k et ce besoin pourra bien sûr être nul pour une période de temps k donnée.
- La surface totale de stockage (à l'exception de la zone de cross-docking qui est proposée comme service logistique et la zone de masse décrite ci-dessous), déterminée par la nature et la quantité d'éléments à stocker, sera notée $Sup(k)$ de l'instant k . Pour simplifier, $Sup(k)$ à un nombre maximal de palettes EPAL ($120 \times 80 \times 200$ cm), notons Sup_{max} . Il convient de remarquer que le 4PL a d'autres clients que de simples entreprises, qui veulent participer à une stratégie de mutualisation. Ainsi, pour chaque période de temps $Sup(k)$ correspond à l'espace de stockage restant (exclure les besoins des clients classiques), avec $0 \leq Sup(k) \leq Sup_{max}$. Pour chaque entreprise i , le maximum requis de surface de stockage également défini en espaces palettes est noté :

$$S_{up}^i(k) \text{ avec } \sum_{i=1}^n S_{up}^i(k) \leq S_{up}(k). \quad (1)$$

- Pour la zone de masse (produits volumineux et produits non conventionnels/palettes), la surface totale de stockage est donnée par $SCDup(k)$ avec $0 \leq SCDup(k) \leq SCDup_{max}$, et la surface totale de stockage requise pour chaque entreprise i est donnée par :

$$SCD_{up}^i(k) \text{ avec } \sum_{i=1}^n SCD_{up}^i(k) \leq SCD_{up}(k). \quad (2)$$

- Ces surfaces requises correspondent à un total de stockage de marchandises représenté par une quantité qui sera identifiée pour chaque entreprise i à la période k par $Q^i(k)$. $Q^i(k)$ est donnée par :

$$Q^i(k) = \alpha_{mass}^i(k).SCD_{up}^i(k) + \alpha_{classical}^i(k).S_{up}^i(k) \quad (3)$$

où $\alpha_{mass}^i(k)$ et $\alpha_{classical}^i(k)$ valeurs connues dans $[0, 1]$. Ces valeurs dépendent du volume et de la masse des marchandises et/ou des palettes.

- Les coûts d'inventaire qui en résultent, qui pourraient être séparés en une partie fixe et une partie variable sont donnés pour chaque période k de temps et chaque entreprise i pour une coalition $S^j(k)$ par :

$$C_{storages^j}^i(S^j(k), Q^i(k)) = a_{S^j}^i(k, S^j(k)) + b_{S^j}^i(k, S^j(k)) \cdot Q^i(k) \quad (4)$$

- Avec $a_{S^j}^i(k)$ la partie fixe liée à la mise en œuvre de l'inventaire requis, $b_{S^j}^i(k)$ la partie variable, et $Q^i(k)$ la quantité de marchandises pour i pendant k . Nous supposons qu'à la fin d'une période k , le nombre total de marchandises stockées sera expédié ou transféré dans un autre entrepôt et ne générera pas de coûts d'inventaire supplémentaires pour la prochaine période de temps $k+1$.
- Les besoins en services logistiques pour chaque entreprise I peuvent être : un service de dédouanement, un emballage spécial, des activités de transbordement, la gestion des stocks, etc. Ces besoins seront notés sous la forme d'un vecteur $L_{services}^i(k)$, qui dépend du type de services logistiques nécessaires pendant k . Si un service logistique est nécessaire, la valeur correspondante sera égale à 1 et sinon elle sera égale à 0 pour tous les services logistiques possibles.
- La contrainte de capacité pour chaque service est donnée par le temps passé pour effectuer ce service pour une entreprise i pendant k , ce temps dépend du nombre de biens pour i pendant k . Le temps passé pour tous les services pendant k pour une entreprise i est donné par un vecteur $T_{services}^i(k)$. La contrainte de capacité temporelle pendant k pour tous les services est donnée par $T_{services-sup}(k)$ avec $0 < T_{services-sup}(k) < T_{services-supmax}(k)$. Il faut donc vérifier que :

$$T_{services}^i(k) \leq T_{services-sup}(k). \quad (5)$$

- Les coûts des services logistiques qui peuvent être séparés en une partie fixe et une partie variable sont donnés pour chaque période de temps k et chaque entreprise i pour une coalition $S^j(k)$ par :

$$C_{logS^j}^i(S^j(k), Q^i(k)) = [a_{logS^j}^i(k) + b_{logS^j}^i(k) \cdot Q^i(k)] \cdot L_{services}^i(k). \quad (6)$$

Avec $a_{logS^j}^i(k)$ une partie fixe liée à la mise en œuvre du ou des services logistiques requis, payée par l'entreprise i , $b_{logS^j}^i(k)$ la partie variable, et $Q^i(k)$ le volume de marchandises pour i au cours de k .

Un coût de transport pour acheminer les marchandises vers l'entrepôt pourrait également être défini pour chaque entreprise. Cependant, dans ce document, par souci de simplicité, nous supposons que l'entrepôt est idéalement situé pour toutes les entreprises et nous ne tenons pas compte du transport. De même, nous ne considérons pas les pertes dues à la casse, au vol, etc.

Ainsi, le bénéfice total (indépendamment des ventes qui sont des bénéfices propres à l'entreprise, les entreprises pouvant être concurrentes ou non) pour l'entreprise E_i , en cas de participation à une mutualisation, est donné par la formule suivante :

$$Max \pi_{S^j}^i(S^j(k), Q^i(k)) = C_{max}^i(k) - [C_{S^j}^i(S^j(k), Q^i(k)) + C_{logS^j}^i(S^j(k), Q^i(k))] \quad (7)$$

Et, le problème bi-objectif pour toutes les entreprises dans $N^+(k)$ à chaque période de temps k , résolu à l'étape 1 par le 4PL, est donné par :

$$max_{S^j(k)} \sum_j v_{storage-j}(S^j(k)) + max_{S^j(k)} \sum_j v_{log-j}(S^j(k)) \quad (8)$$

$$min_{S^j(k)} \sum_r Makespan(r, S^j(k)) \quad (9)$$

Sous réserve des contraintes suivantes :

$$\sum_{i=1}^n S_{up}^i(k) \leq S_{up}(k),$$

$$SCD_{up}^i(k) \text{ with } \sum_{i=1}^n SCD_{up}^i(k) \leq SCD_{up}(k), \quad (10)$$

$$T_{services}^i(k) \leq T_{services-sup}(k).$$

Avec $v_{storage}$ la fonction d'utilité correspondant aux ressources de stockage et v_{log} la fonction d'utilité correspondant aux services logistiques, r une ressource, $r = 1$ to R (le nombre total de ressources). Il convient de noter que ces fonctions d'utilité pour les 4PL dépendent des coûts payés par les entreprises qui participent à une stratégie de mise en commun (c'est-à-dire les prix définis et donnés par le 4PL) moins les coûts réels payés par les 4PL. Ces fonctions d'utilité peuvent être moindres que dans le cas où il n'y a pas de stratégie de mutualisation pour le 4PL mais l'intérêt pour le 4PL est de définir des liens plus fiables avec ces clients particuliers et donc d'obtenir un gain probablement plus important pendant plusieurs périodes de temps du fait de cette fidélité.

Prenons un exemple d'application (Entreprise A (*EA*) et Entreprise B (*EB*)), qui se trouvent dans le même parc industriel, chaque entreprise a 2 choix (participer à la mise en commun (C) et ne pas participer à la mise en commun (NC)). *EA* dispose d'un entrepôt de 1,000 m². *EB* dispose d'un entrepôt de 2,000 m². Des zones spécifiques peuvent être utilisées dynamiquement pour le partage entre deux entreprises. Chaque entreprise fournit une des deux ressources (ressources de stockages et services logistiques) en partage.

Dans cet exemple, nous comparons des profits globaux d'entreprise en fonction de la stratégie déployée :

- Cas 1 (NC, NC), les deux entreprises n'ont pas choisi de participer à la mise en commun des entrepôts.
- Cas 2 (NC, C), *EA* n'a pas choisi de participer à la mise en commun des entrepôts ; *EB* a choisi de participer à la mise en commun des entrepôts.
- Cas 3 (C, NC), *EA* a choisi de participer à la mise en commun des entrepôts ; *EB* n'a pas choisi de participer à la mise en commun des entrepôts.
- Cas 4 (C, C), les deux entreprises ont choisi de participer à la mise en commun, comme nous avons présenté dans le modèle. L'entrepôt est divisé dynamiquement en zones à chaque période de partage.

Nous donnons dans la figure 3.1 des exemples de profits global obtenus pour ces 4 cas.

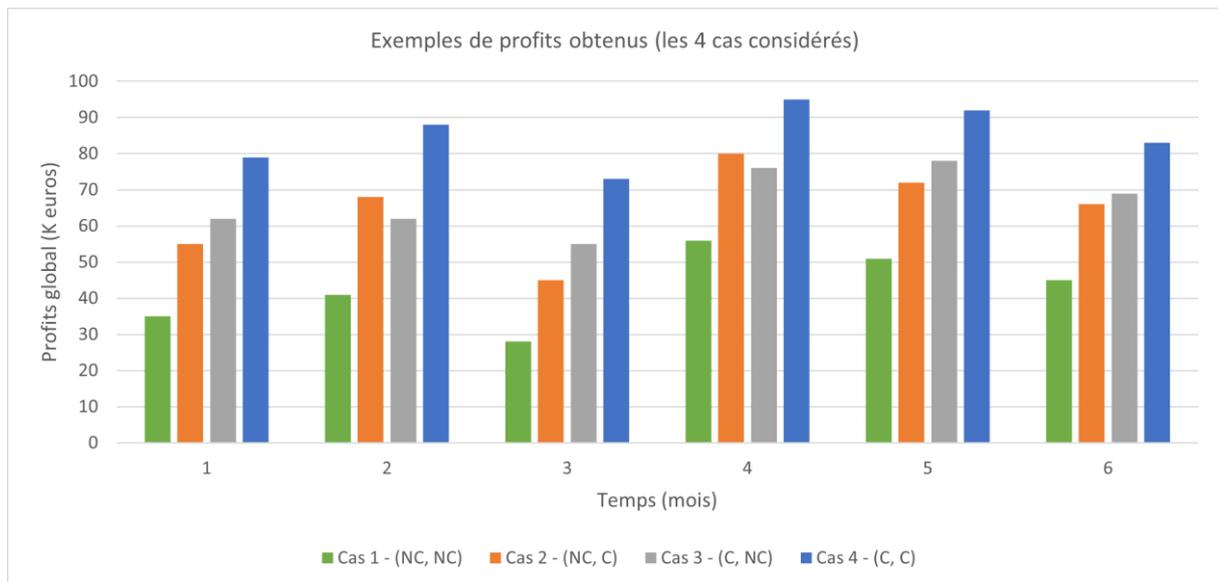


Figure 3.1 Exemples de gains obtenus par l'entreprise

Dans ces exemples (voir dans la figure 3.1), nous constatons que les profits globaux du cas 4 (C, C) sont les plus élevés. Ces zones spécifiques peuvent être utilisées dynamiquement pour le partage en temps réel même s'il y a des coûts pour déployer des ressources industrielles connectées. Ces connexions en temps réel permettent de réduire les places libres inutilisées de l'entrepôt logistique et amène beaucoup de flexibilité, afin de maximiser les profits globaux. Ces résultats dépendent des valeurs des paramètres.

Il est plus avantageux d'un certain point de vue de choisir de collaborer ensemble, tel que la réduction des coûts, la maximisation du gain, etc. Cependant, chaque entreprise peut choisir de collaborer ou ne pas collaborer pour une des deux ressources (ressources de stockages et services logistiques). Cela peut impacter le gain global et aussi le gain de chaque entreprise. L'exemple présenté ici est simple, néanmoins, les conflits de la prise de décision liés à l'allocation des ressources peuvent ne pas être aussi simples dans la pratique. Ces conflits sont influencés par de nombreux éléments que nous allons présenter dans le processus d'appariement (cf. le chapitre 5) afin de mieux gérer l'allocation de ressources entre entreprises.

3.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié les éléments clés pour la prise de décision du partage qui permettent d'avoir une vision globale sur l'aspect décisionnel du partage de ressources. Nous avons alors proposé un modèle basé sur la théorie des jeux permettant d'identifier

facilement les comportements des individus pendant le partage. Enfin nous avons donné un exemple d'entrepôt mutualisé appliqué à la mutualisation en pratique. Dans cet exemple, des entreprises doivent choisir de coopérer ou de ne pas coopérer sans savoir ce que l'autre joueur/entreprise a décidé. Le gain global plus élevé ne peut être obtenu que si les deux joueurs coopèrent, mais de manière irrégulière, la décision de ne pas coopérer peut parfois être due à un manque de confiance par rapport risques, bien que cela aboutisse à une situation dans laquelle les deux joueurs ont quelque chose à perdre. En général, le choix de jeu coopératif devrait être raisonnable car le gain global est maximal, comme nous l'avons constaté dans la figure 3.1.

Cependant, diverses difficultés émergent en lien avec ces stratégies et les technologies développées comme la sécurisation des données et du partage, ainsi que la prise en compte des diverses contraintes. Il est par conséquent nécessaire de définir un schéma global permettant de sécuriser cette mutualisation aussi bien au niveau des échanges qu'en intégrant également la diversité des ressources partagées et la gestion réelle de la mutualisation. Ceci nous amène à développer une plateforme numérique de partage utilisant les outils de l'industrie 5.0 pour résoudre ces problématiques.

En effet, à l'état opérationnel, nous devons contrôler, planifier et surveiller l'utilisation de chaque type de ressources. Dans ce sens, la technologie blockchain sera très utile. Nous proposons d'utiliser les blockchains combinées avec l'IoT afin de gérer efficacement notre partage. Les blockchains permettent une décentralisation du réseau d'objets connectés, qui représentent l'ensemble des activités d'entreposage dans le cadre de la mutualisation définie, et de sécuriser ce réseau, car les transactions enregistrées sur la blockchain ne peuvent être modifiées ou supprimées. De plus, la blockchain résiste bien aux attaques (puisque'il s'agit d'un réseau P2P décentralisé, sans point de défaillance unique (Liu *et al.*, 2019)). Nous détaillons le principe de fonctionnement de la blockchain sur la plateforme proposée dans le chapitre suivant.

Le comportement des acteurs sera intégré sur la base d'un système multi-agents avec une centralisation de l'information publique des acteurs, la possibilité d'intégrer ou de retirer différents clients et prestataires facilement du partage de ressources industrielles, afin de renforcer la confiance et la transparence avec plus de traçabilité et de sécurité des données de partage entre entreprises.

4. Plateforme de partage

4.1. Introduction

Comme nous l'avons présenté dans le chapitre précédent, nous nous sommes intéressés à une approche purement économique pour mettre en avant l'intérêt d'un partage de ressources entre entreprises. Les outils issus des industries 4.0 et 5.0 peuvent nous permettre de gérer plus simplement certaines activités de l'entreprise. C'est pourquoi, nous définissons une plateforme numérique pour mettre en place le partage de ressources au niveau opérationnel.

Dans ce chapitre, nous proposons une architecture à deux niveaux pour gérer complètement la plateforme de partage de ressources entre entreprises. La définition d'une telle plateforme nous permettra de faciliter les échanges et la récupération d'informations. Un premier niveau pour centraliser l'information du public, et intégrant le comportement des acteurs, sur la base d'un système multi-agents (SMA). Le second pour une gestion décentralisée du réseau d'objets connectés basée sur une blockchain de type consortium avec des données publiques et privées (Liu *et al.*, 2021).

4.2. Architecture proposée

Nous proposons une architecture qui modélise les différentes étapes du partage des ressources entre entreprises. Le partage de ressources entre entreprises permet de minimiser les risques globaux. Or, des risques importants de cyber-attaques et de problèmes de sécurité des données (souvent centralisées dans le cloud), couplés à des défaillances dont la propagation est importante en raison de la gestion centralisée, ne facilitent pas leur utilisation. Comme nous l'avons vu dans l'exemple d'application de la mutualisation logistique du chapitre précédent, les blockchains permettent de décentraliser le réseau d'objets connectés et permettent de sécuriser ce réseau, car les transactions enregistrées sur la blockchain après un consensus ne peuvent être modifiées ou supprimées.

En outre, la blockchain est résiliente aux défaillances (puisque'il s'agit d'un outil décentralisé de P2P sans point de défaillance unique). Les blockchains sont alors utilisées afin d'assurer l'enregistrement et la validation des transactions pour des ressources de partage, et des contrats sont programmés et déployés pour sécuriser les données du réseau et des acteurs ainsi que pour gérer l'utilisation du réseau.

Au niveau opérationnel, nous prévoyons d'utiliser conjointement les technologies de l'Internet des objets et de la blockchain pour gérer efficacement les ressources mutualisées considérées. L'IoT, pour sa part, nous permet une identification simple des ressources et des services, et communique sur leur disponibilité, leur utilisation ou leur état. Pour cela, ils doivent être instrumentés de capteurs, d'identifications et des capacités de communication pour partager des données.

Dans notre système, nous pouvons modéliser les spécificités de chaque ressource, ce qui nous permet d'avoir des transactions sécurisées et surveillées sur mesure entre les participants et de faire le meilleur usage opérationnel de ces ressources. De plus l'identité et l'adresse de chaque objet sont contrôlées par la blockchain. Cette blockchain est elle-même constituée par un réseau de nœuds (les mineurs) pouvant exécuter et enregistrer les transactions et permettant la décentralisation. Sur cette base, nous proposons une architecture hybride pour représenter complètement notre système (les acteurs et objets connectés dans la stratégie de ressources).

4.2.1. Principe

Notre plateforme d'entreprise est connectée avec Internet via le cloud pour faciliter le partage et l'intégration de nouveaux clients. Le principal avantage est l'évolutivité offerte comme dans le Cloud Manufacturing. Elle peut aussi aider à transformer des activités simples en activités plus intelligentes, notamment il est plus facile de gérer un système complexe en cloud et d'adapter des besoins facilement par rapport à l'hébergement du site web, des applications et des logiciels sur ses propres ordinateurs et infrastructures. Parce que la maintenance est mise du côté des fournisseurs de cloud avec un support simple.

Cependant, le principal défi du « Cloud Computing » est de garantir la sécurité et la confidentialité des données (Fisher *et al.*, 2018). Le choix du type d'architecture à employer n'est pas simple. En effet, celle-ci peut être centralisée ou décentralisée, mais ces deux alternatives ont chacune des avantages et des inconvénients que nous allons détailler ci-dessous.

Une architecture centralisée permet de faciliter la gestion complète et optimisée du réseau en termes d'usages, de réaffectations ou de modifications, mais aussi en termes de bénéfices économiques. Cependant, elle rend le réseau plus vulnérable aux attaques et fait reposer l'effort de création et de gestion des services sur un nombre limité d'acteurs et prive ainsi ses utilisateurs de nombreuses opportunités d'innovation en tant que bénéficiaires, mais aussi en tant que contributeurs. En outre, cette année, le nombre d'objets connectés dans le monde devrait

avoisiner les 50 milliards selon les estimations (CISCO, 2020). Tous ces objets génèrent des données en continu, qui doivent être stockées et évaluées en temps réel pour les applications critiques, qui occupent une grande part de la bande passante internet. De fait, le principal obstacle à surmonter serait de déployer des réseaux à haut débit, ainsi que de minimiser les temps de latence dans le transfert des données entre les serveurs centraux et les équipements terminaux périphériques, tâche difficile et hors de notre champ d'action.

A l'inverse, une architecture décentralisée permet de transporter des informations sans modification et d'échanger des services de manière neutre, en préservant l'égalité d'accès au réseau pour les nouveaux entrants tout en maintenant l'unicité de ses fonctions essentielles. Elle permet le traitement des données en temps réel et les calculs. De plus, les traitements étant effectués au plus près des sources de données, cela évite les latences. De même, par effet induit, le flux utile est réduit puisque le traitement local des données est privilégié. Enfin, comme la plupart des données restent dans le réseau local, cela simplifie les questions de sécurité.

Néanmoins, le contrôle et l'optimisation de l'utilisation de services peut s'avérer plus complexe à mettre en œuvre, car il s'effectue via un ensemble hétérogène de plusieurs composants réseau, provenant en partie de différents constructeurs, qui communiquent entre eux via un grand nombre d'interfaces. Nous pouvons également craindre une non-appropriation par les acteurs et un phénomène de concurrence aux extrémités du réseau (concurrence sur le marché, le prix et les profits etc.). À cela s'ajoutent des coûts plus élevés, puisque le nombre de composants matériels est plus important que dans une solution centralisée, et enfin, la maintenance nécessite également un investissement plus important en raison du nombre de composants.

C'est pourquoi, notre choix se porte sur une architecture à deux niveaux. Le premier niveau permet de centraliser les informations publiques, le partage des activités/services offerts par l'IoT mais aussi d'intégrer l'évolution du comportement des acteurs et de contrôler le partage. Ce niveau est basé sur un système multi-agents (SMA), pour identifier clairement toutes les stratégies possibles des acteurs. Ce SMA comprend également des modules d'intelligence artificielle (IA) et de Big Data dédiés aux données du marché (analyse, apprentissage et intégration) (Liu *et al.*, 2021b). Le second niveau permet de connecter tous les éléments (acteurs et ressources partagées) et de contrôler l'ensemble en gestion décentralisée de l'IoT industriel.

Les interactions entre les différents modules sont détaillées dans la figure 4.1 suivante.

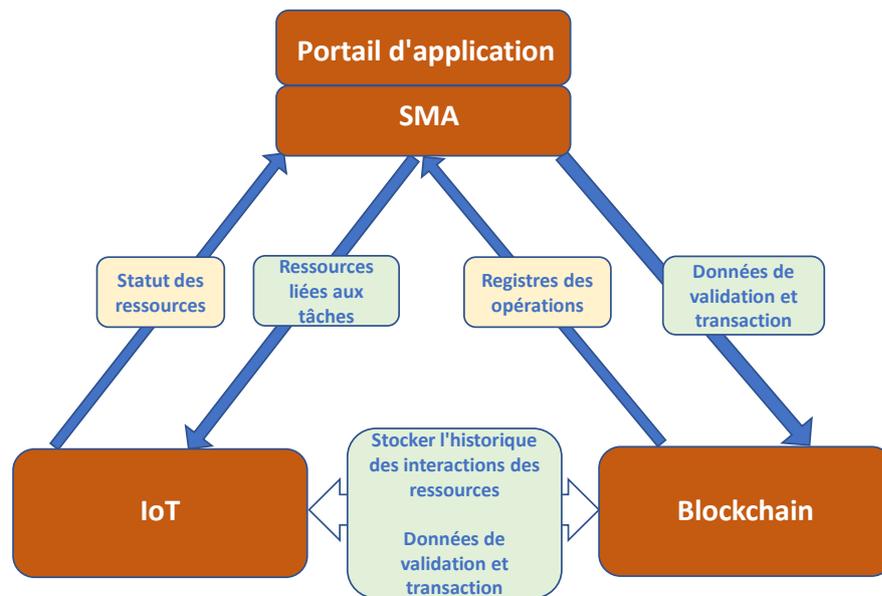


Figure 4.1 Interactions entre les différents modules de la plateforme.

Cette architecture proposée permet de coupler les avantages des deux approches (centralisée et décentralisée). L'objectif principal de ce chapitre est de présenter plus en détail l'architecture complète ainsi que l'IoT et la blockchain combinés, qui aident à sécuriser, gérer et contrôler l'IoT industriel.

Notre architecture complète est composée de trois modules : le système physique d'IoT, le réseau blockchain et le SMA en cloud. Ces trois modules peuvent communiquer via l'API REST pour échanger des données, ce qui permet l'encapsulation de plusieurs réseaux de la blockchain et/ou dispositifs IoT préexistants. Une API REST est une interface de programmation d'applications et constitue la norme pour l'utilisation de webservices. Elle est composée d'un ensemble de règles qui permettent à différentes applications de communiquer. Elle est accessible via le protocole HTTP pour l'envoi de requêtes et renvoie des réponses qui peuvent être formatées en JSON, XML, YAML ou HTML. Comme les API REST sont plus rapides et légères par rapport à autre types d'API, telles que l'API SOAP ou l'API GraphQL, elles sont donc idéales pour servir d'intermédiaire entre les clients et les applications IoT dans notre plateforme. Dans la couche blockchain du consortium, l'accès des différents acteurs (les entreprises) se fait par le biais d'un certificat. Les entreprises peuvent ainsi gérer les droits d'accès de plateforme du partage permettant la sécurisation des données.

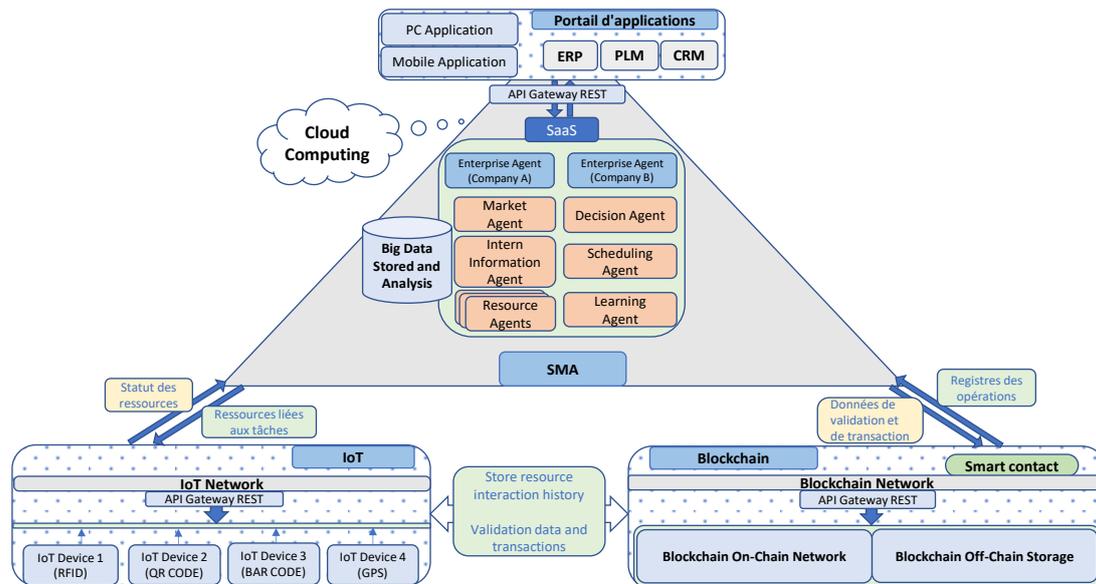


Figure 4.2 Architecture proposée.

L'architecture globale contient donc trois modules (voir dans la figure 4.2) :

- **IoT – Système physique** : Il permet de collecter des données synchrones (comme les données en temps réel sur la localisation des ressources) ou des données asynchrones (comme les données générées en temps différé par les machines) pour améliorer la traçabilité des ressources partagées.
- **Blockchain** : Nous utilisons la technologie consortium blockchain avec un principe on-chain et off-chain pour sécuriser les données privées des entreprises (offres, prix, etc.), optimiser la traçabilité de ressources partagées (stocker des transactions de partages).
- **Système multi-agents (SMA)** : C'est le cœur de la plateforme proposée. Ce module nous permet en effet de manager le partage de ressources avec des activités d'appariement et d'affectation des ressources aux demandeurs pour leur utilisation tout en tenant compte d'évolutions possibles dans le temps. Il contient un portail d'entrée pour les entreprises dans lequel se trouvent les applications ou les sites web permettant la connexion et l'accès aux services de partage. Ce module permet via ses interactions avec le SMA de lancer des activités du processus d'appariement et de faire des analyses big data et via le module Blockchain de consulter des données de traçabilité, telles que les transactions, ou via le module IoT de suivre les données liées aux opérations réalisées sur les ressources.

4.2.2. IoT – Système physique

Dans ce qui suit, nous allons présenter le système physique d'IoT en détaillant les différentes couches définies et leur rôle.

Au cours des dernières années, la technologie IoT est devenu l'une des technologies les plus importantes, ce qui permet aux objets de se connecter et d'échanger des données. Ces connexions prennent en charge une grande variété des applications, principalement dans les soins de santé et les activités de fabrication/chaîne d'approvisionnement. L'IoT n'est pas une technologie unique mais une combinaison de différentes technologies (technologies de communication et d'information, technologies de capteurs et d'actionneurs électroniques, informatique et analytique) (Atzori *et al.*, 2010).

Actuellement, il n'existe toujours pas d'architecture standard pour les IoT, mais nous pouvons trouver différentes architectures à trois, quatre ou cinq couches. Quoi qu'il en soit, chaque couche doit tenir compte des questions de sécurité et de confidentialité pour garantir la sécurité des applications IoT. Malgré ces utilisations croissantes, le développement de plus en plus important des IoT, et en parallèle, la plupart de ces réseaux IoT sont encore faciles à pirater et à compromettre en raison de leurs limites en matière de calcul, de capacité réseau, d'architecture centralisée, d'efficacité énergétique et de stockage (Granjal *et al.*, 2015).

Dans ce travail, nous considérons différents types de ressources, qui pourraient être partagées comme le transport, le stockage physique, les ressources humaines, les robots, les machines, les informations logistiques, etc. Différentes ressources ou groupes de ressources peuvent être ajoutées dans l'IoT considéré et un numéro d'identification distinctif est attribué à chaque dispositif/élément connecté dans le réseau de l'Internet des Objets.

L'IoT est décrit classiquement par plusieurs couches (Green, 2014), comme nous l'avons présenté dans la partie précédente (cf. chapitre 2.4.2). Dans notre proposition, nous avons proposé une architecture à cinq couches pour être plus lisible et pouvoir modéliser les différentes étapes. Ce cadre IIoT et le lien avec la blockchain sont présentés dans la figure 4.3 avec :

- La couche perception/capteurs (appelée Perception Layer) avec les objets connectés, les capteurs et les actionneurs qui permet d'obtenir différents types d'informations

(dynamiques/statiques) à partir des objets et de les partager via un processus de connectivité.

- La couche réseau (appelée Communication Layer) qui permet de prendre en charge le transfert d'informations via un réseau sans fil.
- La couche ressources (appelée Resource Layer) qui permet d'envisager l'interopérabilité avec les ressources humaines et de faciliter ces échanges.
- La couche service (appelée Service Layer) qui permet d'intégrer les services et les applications par le biais d'une technologie middleware.
- La couche d'interface (appelée Interface system) qui affiche des informations aux acteurs qui interagissent avec le système IIoT.

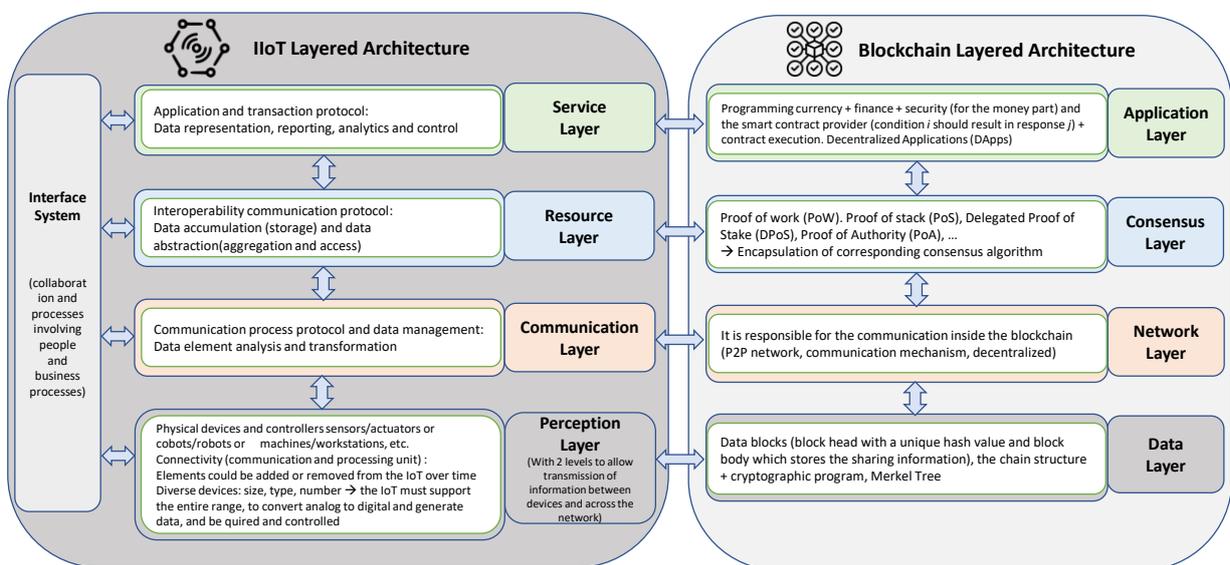


Figure 4.3 La structure en couches de l'architecture de IIoT et lien avec la blockchain.

En effet, tous les accès des ressources partagées sont connectés par le système physique d'IoT, qui peut ainsi tracer toutes les actions de partage de ressources. Ces données de traçabilité peuvent être stockées via la blockchain avec les avantages d'avoir des données transparentes et sécurisées, car les informations sont tracées et ne peuvent être détruites. Cependant, la technologie blockchain présente également des inconvénients comme les problèmes de performance (par exemple Bitcoin aurait une limite de 7 transactions par seconde (TPS) (Poon & Dryja, 2016)) et aussi, puisqu'il s'agit d'une technologie récente et complexe, il est encore coûteux de développer et maintenir une application blockchain. De plus, il est

difficile d'intégrer les données de systèmes existants vers une blockchain. Cependant, malgré ses inconvénients, la technologie blockchain est intéressante. Donc, nous proposons d'utiliser les blockchains (via une plateforme open source Ethereum ou Hyperledger Fabric (Androulaki *et al.*, 2018)) afin de gérer le réseau IIoT efficacement et de le sécuriser, car les transactions enregistrées sur la blockchain ne peuvent être modifiées ou supprimées. De plus, la blockchain résiste bien aux attaques (puisque'il s'agit d'un réseau P2P décentralisé, sans point de défaillance unique).

Nous présentons dans ce qui suit le principe du module blockchain.

4.2.3. Blockchain

Pour connecter la blockchain et l'IoT, nous proposons de connecter la blockchain aux couches de l'IoT, comme indiqué dans la figure 4.3. Pour ce faire, nous utilisons les niveaux de communication des données de chacune des couches de l'IoT puisque ces niveaux sont liés au stockage et à l'échange de données. Cette méthode est la plus développée (Ali *et al.*, 2018), mais il est nécessaire d'identifier clairement la blockchain afin de gérer les données en mouvement en raison de la forte contrainte d'immuabilité de la blockchain. De plus, comme nous devons intégrer la traçabilité, la sécurité et les d'applications, nous devons connecter la blockchain non seulement à l'IoT, mais aussi aux autres couches de la plateforme développée. À partir de là, nous obtenons la structure en couches de l'architecture de la blockchain suivante, voir également la figure 4.3 et (Liu *et al.*, 2020 ; Ren *et al.*, 2021).

La première couche représente le corps de la blockchain et agit comme un grand livre de données partagées.

La deuxième couche permet la communication entre les nœuds de la blockchain. Les nœuds de la blockchain sont distribués dans différents endroits physiques avec des rôles égaux, ce qui permet la décentralisation. Ce qui en fait une force de la blockchain, car les individus n'ont plus besoin d'organisation hiérarchique pour gérer les liens et les contrats.

La troisième couche permet de définir une blockchain publique ou privée ou un consortium (privé et public). Puisque nous avons différents types d'acteurs, nous privilégions une blockchain de type consortium et un système open-source tel que Hyperledger Fabric qui permet une décentralisation partielle et une vitesse de transaction moyenne. Les blockchains de

consortium nous semblent en effet plus adaptées à un partage de ressources et de services. Dans la couche blockchain du consortium, l'accès pour les différents acteurs (entreprises A, B, C ...) se fait par une autorité de certification (Certificate Authority ou CA dans Hyperledger Fabric). Les entreprises ainsi gérées comme une alliance de partage permettent la sécurisation des données.

La dernière couche fournit diverses interfaces pour les utilisateurs et pourrait évoluer avec le temps et les acteurs.

Dans ce travail, nous proposons deux types d'utilisation de la blockchain : le réseau on-chain et le stockage off-chain. Pour la sécurité et la traçabilité, la blockchain on-chain stocke toutes les transactions de décision prises. La blockchain off-chain stocke les données non transactionnelles et trop volumineuses, telles que les fichiers images, les documents, etc. La transaction off-chain ne nécessite pas de confirmation de la part du réseau blockchain, elle ne nécessite qu'une tierce partie travaillant comme garant pour assurer le succès de la transaction en ayant un accord de transfert entre les deux parties, ce qui est plus efficace.

De plus, le SMA va être connecté au réseau blockchain par API Rest pour favoriser l'échange et le partage d'informations. À un premier niveau, le SMA va stocker les décisions de choix de ressources de partage dans le réseau on-chain de la blockchain pour la sécurité et la traçabilité des données du choix de ressources. À un second niveau, des agents ressources du SMA sont connectés au système décentralisé (le système physique d'IoT) ce qui permet de fournir les ressources disponibles pour le partage. Ils permettent de récupérer des données pour identifier les ressources, valider des données et des transactions d'opération, et les stocker dans le réseau blockchain. À ce titre, les données en temps réel (comme les données de localisation des ressources) ou en temps différé (comme les données générées par les machines) sont stockées dans la blockchain off-chain. De même, les données de fabrication des partenaires ou des fournisseurs gérées par des agents permettant d'utiliser les technologies d'exploration du Web pour l'acquisition de données d'information marketing à partir de réseaux sociaux publics, sont également stockées dans la blockchain off-chain. Le détail du SMA est donné dans ce qui suit.

4.2.4. Système multi-agents

Notre SMA est un système multi-agents ouvert, puisque de nouveaux acteurs pourraient accéder à la plateforme. Il est composé d'agents cognitifs et réactifs avec un contrôle décentralisé, parce que les agents ont un certain degré d'autonomie et vont coopérer à travers des processus de négociation/compétition pour atteindre la meilleure organisation possible du partage des ressources. Les agents cognitifs sont capables, au niveau individuel, d'effectuer des opérations relativement complexes. Ils ont des plans explicites, ainsi qu'une base de connaissances contenant une variété d'informations liées à la gestion des interactions avec d'autres agents et à leurs domaines d'expertise, ce qui leur permet d'atteindre leurs objectifs. Les agents réactifs ont un comportement simple et ne sont pas capables de réagir aux changements de leur environnement.

Dans notre SMA, pour des raisons de simplicité, nous considérons deux entreprises : l'entreprise A, qui a besoin de ressources, et l'entreprise B, qui est un fournisseur de ressources. Nous disposons des agents suivants : Resource Agent, qui permet de gérer les ressources de l'entreprise ; Decision Agent qui permet de déterminer et faire le choix de ressources entre les demandes et les offres ; et Scheduling Agent qui permet de planifier en temps réel et de créer des tâches. Intern Information Agent permet de centraliser des informations. Market Agent permet de gérer les évolutions du marché en récupérant les données publiques sur Internet et les réseaux sociaux. Learning Agent permet d'utiliser l'intelligence artificielle (IA) pour aider Decision Agent à prendre ses décisions. Notre SMA contient donc sept agents (voir dans la figure 4.4). Nous les détaillons dans ce qui suit.

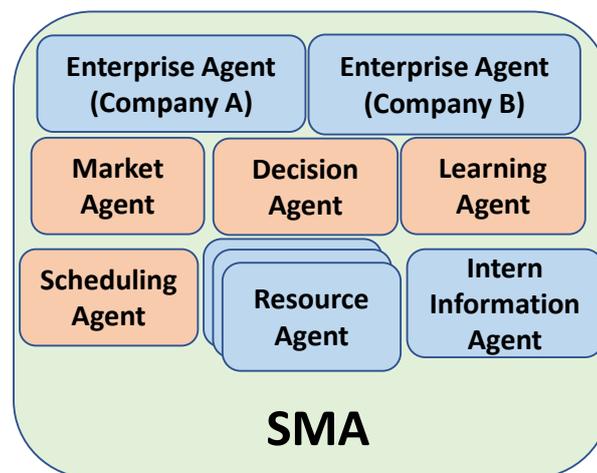


Figure 4.4 Les sept agents dans le SMA.

Nous proposons trois agents réactifs avec un comportement simple :

- Intern Information Agent, qui est un agent de type bibliothèque dans notre système et qui permet de définir les caractéristiques de l'entreprise (paramètres prédéfinis, type d'entreprise, contrat d'entreprise), les informations sur les ressources (le type de ressources, le planning de la maintenance prévisionnelle etc.). Il peut également récupérer les données des ressources par le système physique d'IoT. Il contient principalement trois types de données : la connaissance de l'entreprise fournisseur (définition des caractéristiques de l'entreprise), la connaissance des règles de décision (définition des règles pour prendre la décision concernant le choix des ressources) et les données des Resources Agents (définition des informations sur les ressources).
- Enterprise Agent, qui supporte la couche d'application de la plateforme pour lancer des demandes de ressources ou envoyer des offres de ressources de l'entreprise fournisseur.
- Resource Agent, qui permet de traiter les tâches d'utilisation définies par Scheduling Agent et envoyer des données en temps réel à Intern Information Agent.

Enfin, nous proposons quatre agents cognitifs qui communiquent et collaborent avec Intern Information Agent à un niveau stratégique. Ces agents cognitifs disposent d'une base de connaissances avec une variété d'informations liées à la gestion des interactions avec d'autres agents et à leurs domaines d'expertise qui permettent d'atteindre leurs objectifs.

- Scheduling Agent, qui permet de fournir la planification des ressources. Il peut classer les ressources des fournisseurs selon des conditions prédéfinies s'il y a plusieurs ressources de même type disponibles. Scheduling Agent retourne ces informations sur le classement des ressources disponibles chez les fournisseurs (y compris une liste par types de ressources) à Decision Agent, triées par critères (taux de service, prix, durée, etc.).
- Market Agent, qui permet de gérer les évolutions du marché en récupérant les données publiques sur l'utilisation des ressources (de l'entreprise fournisseur et, aussi, de ses partenaires) et les données des réseaux sociaux (Facebook, LinkedIn, Tweeter...). Nous pouvons utiliser un robot d'indexation comme un outil pour

collecter les ressources (des pages web, des documents, des images, des vidéos, etc.). Nous utilisons cet outil pour l'acquisition des données des réseaux sociaux avec Market Agent (Zhou *et al.*, 2018). Cet agent permet aussi de gérer les données des partenaires ou de l'entreprise fournisseur.

- Learning Agent, qui permet l'application de règles issues de l'IA (apprentissage automatique) pour aider Decision Agent à prendre ses décisions. En effet, le système effectue le nettoyage et le formatage des données et les stocke dans une base de données pour fournir des données au Learning Agent. Dans le Learning Agent, nous appliquons des outils d'IA pour faire des modèles de prédiction sur les futures demandes probables de ressources partagées liées à des évolutions possibles sur le nombre et les besoins des clients et générer des trajectoires cibles d'évolution.
- Decision Agent, qui permet de prendre des décisions d'utilisation des ressources (cf. processus d'appariement, chapitre 5) entre les demandes de ressources des entreprises et les ressources offertes par les entreprises fournisseurs. Decision Agent peut utiliser les trajectoires cibles d'évolution données par Learning Agent pour faciliter sa prise de décision.

Le système multi-agents est le noyau de notre système et peut également permettre d'adapter plusieurs fournisseurs de service (notamment des plateformes Cloud, par exemple Amazon Web Services (AWS), Microsoft Azure, Alibaba Cloud, Google Cloud Platform (GCP), etc.) pour faciliter l'intégration d'infrastructure informatique préexistante d'une entreprise. Ainsi des entreprises qui ont leurs propres serveurs centralisés et regroupés en cloud, peuvent se connecter au réseau via notre plateforme pour fournir des services. Dans l'architecture, les applications SMA sont hébergées en multcloud (plusieurs Cloud du même type public ou privé) par les différents fournisseurs de services.

Dans notre architecture de système hybride, le système physique IoT, le réseau blockchain et le SMA sont communs à chaque type de ressource industrielle. Cependant, le besoin de partage de chaque type de ressource peut être différent afin de s'adapter aux besoins spécifiques de chaque partage.

Toutes les applications industrielles sont implémentées comme un service sur le cloud SaaS (Software as a Service). SaaS permet à un logiciel et ses données d'être hébergés de manière centralisée en cloud. SaaS est un service, qui est un modèle de distribution de logiciel à travers

le Cloud reconnu. C'est le plus facile à déployer, livrer et maintenir (Seethamraju, 2015). Pour la performance et la fiabilité, nous choisissons un SMA en cloud. En effet, grâce à un logiciel SaaS, les entreprises n'ont plus besoin d'installer et de lancer des applications sur leurs propres ordinateurs ou sur leurs Data Centers. Le coût d'acquisition de matériel est ainsi éliminé, au même titre que les coûts d'approvisionnement et de maintenance, de licence de logiciel, d'installation et de support. De plus, l'interface API REST dans le cloud SaaS permet d'accéder facilement au service de la plateforme de partage de ressources aux entreprises.

Les applications industrielles en cloud sont connectées et contrôlées via la plateforme du SMA afin de permettre les négociations entre les acteurs en cas de changements et de problèmes. En effet, le SMA permet de caractériser les comportements réels des entreprises et du marché pour prendre des décisions dynamiques et diffuser les évolutions de stratégie via le portail d'application. Le SMA est également connecté au système physique d'IoT, pour intégrer les changements de ressources tels que les pannes, et à la blockchain, qui se comporte comme un middleware, ce qui permet d'augmenter le niveau de sécurité du réseau. En effet, les entreprises pourraient être concurrentes et ne voudraient donc pas partager leurs propres données.

Nous comptons également plusieurs autres avantages. Premièrement, le système de décision dans le « Cloud Computing » permet d'héberger et de gérer l'ensemble des données nécessaires au partage des ressources (provenant par exemple de l'ERP de l'entreprise, de la planification définie, des prévisions, des données réelles, etc.). En effet, la plupart des entreprises industrielles utilisent déjà des systèmes internes, par exemple : les ERP (Entreprise Ressource Planning), CRM (Customer Relationship Management), etc., mais certaines données peuvent être transférées dans notre système de ressources industrielles partagées. Pour ce faire, nous proposons l'interface API Rest ou un outil pour récupérer et réutiliser ces données existantes et les mettre dans le module « Big Data » du Market Agent dans le SMA. L'accès des entreprises au service de partage de ressources est ainsi facilité, car ne nécessitant pas d'installation supplémentaire et l'intégration de leurs données est simplifiée. De plus, la plateforme fournit un service sécurisé qui permet de réduire le risque de cybers attaques pour toutes les entreprises.

En conclusion, dans cette partie, nous présentons un système multi-agent basé sur une architecture cloud pour une plateforme d'application de partage de ressources. L'architecture que nous proposons est définie à deux niveaux incluant une première partie basée sur le paradigme multi-agents afin de modéliser correctement les acteurs et leurs évolutions et une

seconde partie pour héberger les blockchains dédiées aux liens acteurs/objets connectés en cloud.

Dans la partie suivante, nous détaillons le principe de fonctionnement de la plateforme de partage proposée.

4.3. Principe de fonctionnement

4.3.1. Interactions dans les Swimlanes

Le système physique d'IoT correspond au niveau « Physical world ». Les 2 modules (SMA et la blockchain) de notre architecture sont dans « Digital world » (voir la figure 4.5). Decision Agent dans le SMA permet de prendre des décisions pour le partage de ressources industrielles. Decision Agent est un agent central qui va mener la décision du partage de ressources. Toutes les transactions de prise de décision stockées dans les réseaux blockchain permettent de garantir des données avec le plus de sécurité, transparence, traçabilité et confiance. Les deux diagrammes swimlane suivants permettent de mieux expliquer les interactions entre les agents du SMA dans le « Digital world » (voir dans les figures 4.6 et 4.7).

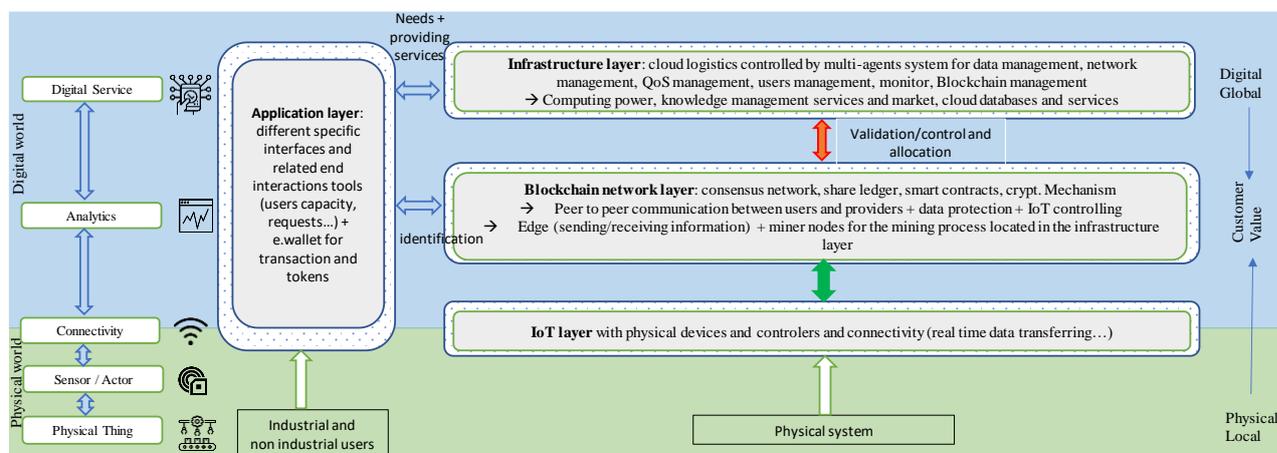


Figure 4.5 Liens entre le monde physique et notre plateforme.

4.3.1.1. Swimlane du niveau stratégique

Comme nous l'avons vu, trois agents cognitifs (Market Agent, Learning Agent et Decision Agent) qui communiquent et collaborent avec Intern Information Agent à un niveau stratégique permettent d'améliorer la qualité de la prise de décisions du partage de ressources grâce à l'IA (ou apprentissage automatique (ML)), voir dans la figure 4.6 :

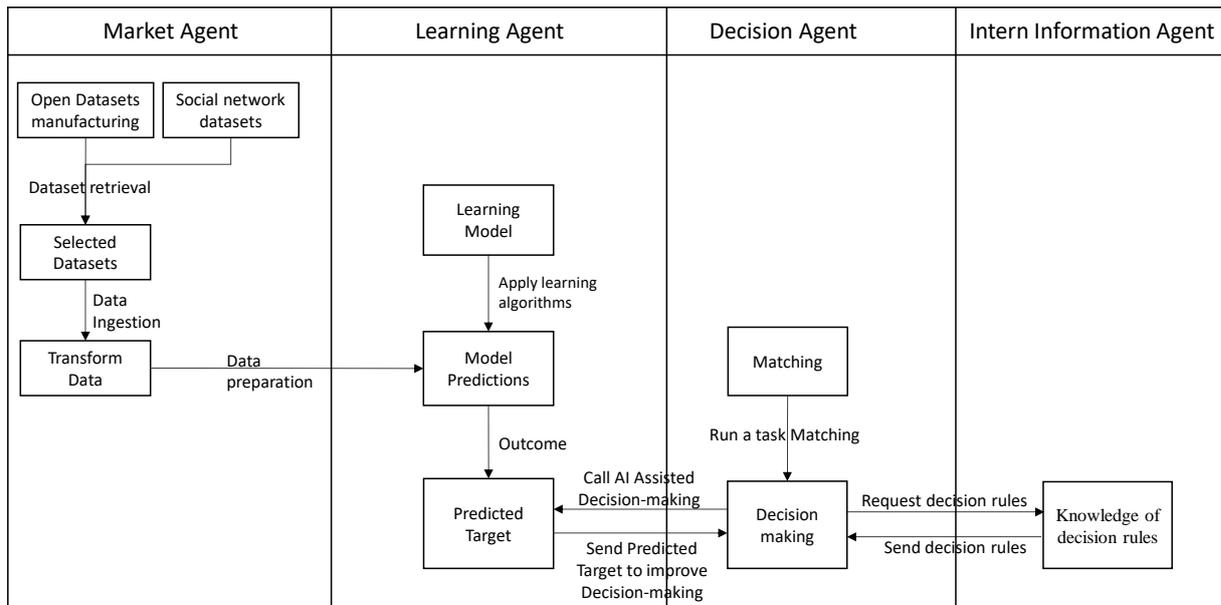


Figure 4.6 Swimlane du niveau stratégique.

Ainsi, Market Agent permet d’analyser et de prévoir les changements du marché en utilisant des données provenant de sources multiples, telles que les données d’entreprise fournisseur et partenaire, ainsi que les données publiques issues des réseaux sociaux. Ces données sont collectées à l’aide d’outils qui réalisent la récolte des informations. Learning Agent permet de prédire les trajectoires (les mouvements futurs des agents) d’utilisation des ressources en utilisant des données collectées et appliquer des règles issues de l’IA afin d’aider Decision Agent à prendre des décisions. Decision Agent permet de prendre des décisions du partage de ressources entre les demandes et les offres. Decision Agent peut utiliser les trajectoires cibles d’évolution des données et la connaissance des règles de décision pour faciliter sa prise de décision du partage de ressources.

4.3.1.2. Swimlane du modèle de partage des ressources

Nous avons trois agents réactifs dans notre SMA : Enterprise Agent, Resource Agent, Intern Information Agent. Nous modélisons d’abord le processus de partage des ressources entre entreprises à l’aide du diagramme présenté à la figure 4.7. Comme nous l’avons présenté dans la section précédente, nous considérons deux entreprises :

- Entreprise A, qui a besoin de ressources.
- Entreprise B, qui est un fournisseur de ressources.

Nous avons les agents suivants : « Resource Agent » qui permet de gérer les ressources de l’entreprise ; « Decision Agent » qui permet de déterminer et de mapper les ressources.

Ressources ; et « Scheduling Agent » qui permet de planifier en temps réel et de créer des tâches. Le scénario est le suivant.

Étape 1 : L'entreprise A est à la recherche d'un service/activité et fait une demande à Decision Agent.

Étape 2 : Decision Agent va ensuite analyser cette demande et les ressources associées avant de la transférer à Scheduling Agent.

Étape 3 : Scheduling Agent analyse la disponibilité des ressources et envoie une demande à Resource Agent qui fournit le service offert par l'entreprise B.

Étape 4 : L'entreprise B peut rechercher un service dans Resource Agent pour obtenir les ressources disponibles à partager.

Étape 5 : Enfin, Decision Agent analyse les demandes pour l'appariement entre les demandes et les offres.

Le système enregistre le processus d'appariement dans le réseau blockchain. Il ne stocke pas les mises à jour des flux avant le traitement de l'appariement.

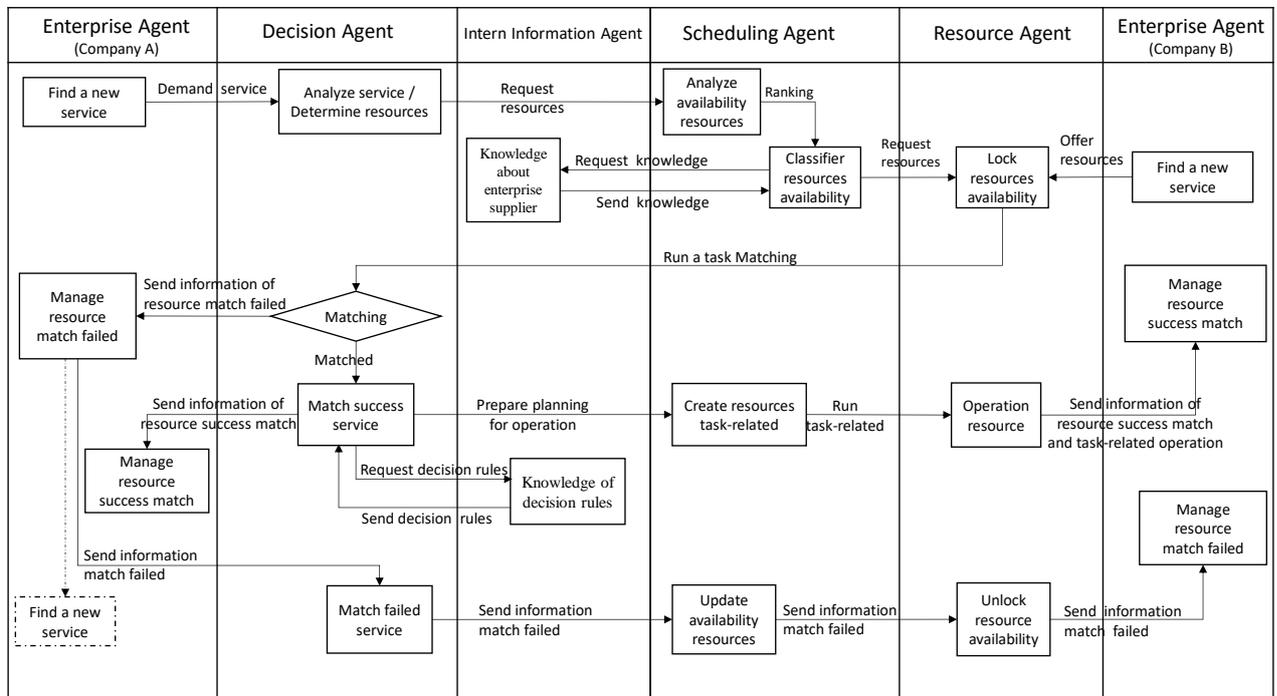


Figure 4.7 Swimlane du modèle de partage des ressources.

4.3.2. Échange de données

Market Agent collecte 2 types de données : les données récupérées dans notre plateforme et les données externes (réseaux sociaux essentiellement). Le détail de la gestion est donné dans ce qui suit.

- **Enterprise businesses data**

Market Agent gère les données des entreprises collectées avec l'accord des entreprises clientes à partir des applications d'interfaçage. Ainsi, nous avons deux étapes de traitement.

Étape 1 :

Enterprise Agent supporte des outils d'importation de données au format CSV, XML et JSON pour l'acquisition de données.

Ainsi, si ces données existent dans l'application d'entreprise telles que ERP, SAP, CRM, il peut exporter les données structurées par Enterprise Agent dans un fichier au format CSV, XML ou JSON. Ensuite, il place le fichier dans un répertoire défini par Enterprise Agent. Enterprise Agent prend ces fichiers structurés et les envoie à Market Agent.

Étape 2 :

Market Agent reçoit les fichiers de données de l'Enterprise Agent et traite le nettoyage des données, puis les envoie au stockage des données.

- **Social networking data**

Nous pouvons utiliser les technologies de crawler web (également appelé robots d'exploration) pour réaliser l'acquisition de données pour l'exploration de données d'informations marketing (Zhou *et al.*, 2018). Voici le processus d'exploration des pages web dans Market Agent (voir la figure 4.8) :

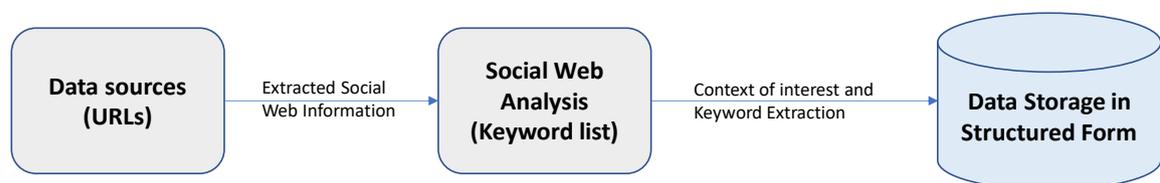


Figure 4.8 Le processus d'exploration des pages web.

Étape 1 :

Nous définissons des URL de sites Web comme sources de données avant d'exécuter le module d'exploration du Web. Les URL des sites Web peuvent être des pages Web de réseaux sociaux tels que Facebook, LinkedIn, ou Tweeter, etc. Les outils d'exploration du Web peuvent alors extraire ces informations sur le Web social et préparer l'étape suivante, l'analyse du Web social.

Étape 2 :

Nous définissons le contexte d'intérêt dans la liste de mots-clés dans ce sous-module. Nous utilisons ces définitions pour analyser les informations du web social de l'étape 1 afin d'obtenir les informations intéressantes et utiles pour le stockage des données.

Étape 3 :

Nous obtenons des informations intéressantes et utiles, nous structurons ces informations et les stockons dans une base de données big data.

Le processus de Learning Agent permet d'utiliser ces deux types de données collectées pour entraîner et sélectionner des algorithmes d'apprentissage de Machine Learning pour aider à prendre la décision du partage de ressources. Les trois principaux types d'algorithmes d'apprentissage automatique sont l'apprentissage supervisé, l'apprentissage non supervisé et l'apprentissage par renforcement.

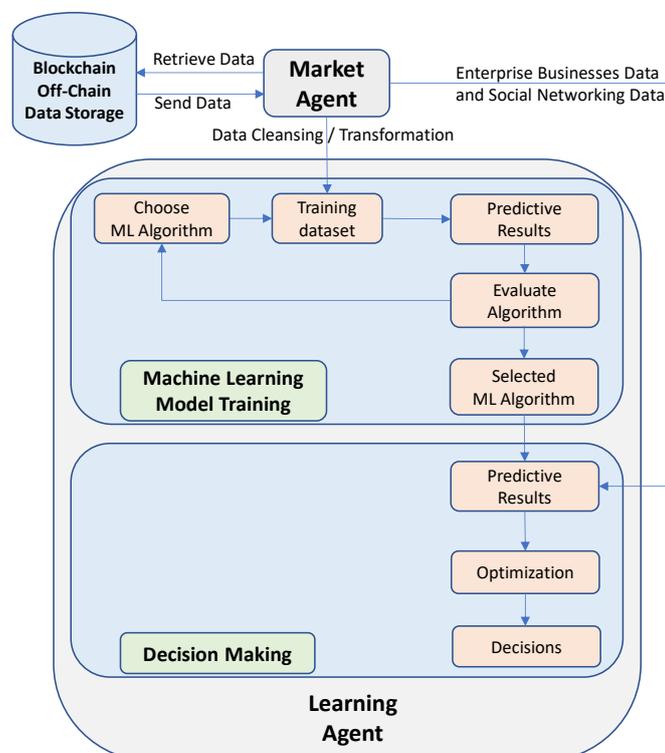


Figure 4.9 Le processus de Learning Agent.

Notre système d'aide à la décision multi-agents est basé sur le mécanisme de prise de décision centralisé par Decision Agent. Learning Agent permet d'optimiser la prise de décision pour le processus d'appariement. Les ensembles de données sont gérés par Market Agent ; Market Agent récupère les données de la blockchain, puis les envoie à Learning Agent pour le nettoyage et la transformation des données. Le processus de formation du modèle d'apprentissage automatique consiste d'abord choisir l'algorithme (tel que K-means Clustering, Hierarchal clustering, XGBoost, etc. (Chen *et al.*, 2016 ; Mahesh, 2020)) et le jeu de données de formation, puis à obtenir le résultat de la prédiction. Il est important de tester la performance (validation) et d'évaluer l'algorithme avec des résultats de prédiction. Dans ce diagramme Learning Agent process (voir la figure 4.9), il y a principalement 2 étapes :

- **Étape 1 - Machine Learning Model Training**

Cette étape est réalisée par le module « Machine Learning Model Training ». Il permet de déterminer et sélectionner le meilleur algorithme par « Training dataset » avec des données trouvées dans Market Agent.

Dans ce module, avant de lancer le modèle d'entraînement, plusieurs algorithmes de Machine Learning sont initialisés. Ils sont alors testés à partir d'un jeu de données d'entraînement fourni par Market Agent qui consulte les données stockées dans le réseau blockchain off-chain stockage.

Ensuite, ce module choisit un autre algorithme pour faire la même procédure (Choisir un algorithme → Entraîner cet algorithme avec un jeu de données → Prédire des résultats → Évaluer l'algorithme). Une fois tous les algorithmes bouclés, le traitement de sélection de Machine Learning algorithmes va être lancé. À partir de là, des résultats prédictifs sont obtenus par différents algorithmes et en fonction du jeu de test, le meilleur algorithme est identifié. Ce traitement de sélection de Machine Learning algorithmes est le traitement pour déterminer le meilleur algorithme utilisé et sélectionner le meilleur algorithme pour l'étape 2, Prise de décision.

- **Étape 2 - Prise de décision**

La prise de décision qui permet d'utiliser le meilleur algorithme sélectionné pour analyser des données vient de Market Agent.

La procédure est le traitement de prédiction des résultats dans Learning Agent qui va d'abord appliquer le meilleur algorithme sélectionné et prendre les données (Enterprise Businesses data and Social Networking data) fournies par Market Agent. Ensuite, il va optimiser le résultat de prédiction pour aider Decision Agent à prendre la décision du partage de ressources. À la fin, il va générer ses décisions de prédiction et les envoyer à Decision Agent.

En conclusion, nous pouvons noter que cette architecture à deux niveaux « Physical world » et « Digital world » (voir dans la figure 4.5) permet de centraliser les informations publiques, le partage des activités et des services supportés par l'IoT, mais aussi, d'intégrer l'évolution du comportement des acteurs et de contrôler le partage. Ceci est réalisé par le SMA avec des outils d'IA (ou ML) et de big data (analyse, apprentissage et intégration) pour récupérer les données dans notre plateforme et les données externes qui permettent d'identifier clairement toutes les stratégies possibles des acteurs et leurs interactions. Le deuxième niveau permet une gestion décentralisée de l'IoT pour utiliser dynamiquement les objets connectés et réaliser des tâches prédéfinies.

4.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous décrivons l'architecture et les éléments de notre plateforme d'entreprise dédiée en particulier au partage de ressources industrielles connectées.

L'architecture que nous proposons est définie selon deux niveaux incluant :

- Une première partie basée sur le paradigme multi-agents afin de modéliser correctement les acteurs et leurs évolutions. Ce mécanisme permet d'obtenir la robustesse nécessaire à ce type de proposition et simplifie la gestion opérationnelle du réseau et de ses composants. En effet, le contrôle et l'optimisation de l'utilisation des services peuvent être complexes à mettre en œuvre sans un système multi-agents, car ils sont définis via un ensemble hétérogène de composants et un possible phénomène de concurrence aux extrémités du réseau pourrait apparaître.
- La deuxième partie permet l'hébergement de blockchains dédiées aux liens acteurs/objets connectés. En effet, la technologie blockchain apporte des fonctionnalités de sécurité telles que l'immutabilité des données enregistrées. De

plus, les blockchains sont décentralisées, ce qui les rend résilientes, un avantage significatif induit dans un environnement industriel.

Ensuite, trois modules sont définis : IoT, Blockchain, SMA en cloud.

- IoT permet de gérer des ressources industrielles connectées et collecter des données.
- Blockchain permet de sécuriser les données, exécuter et enregistrer les transactions et gérer l'utilisation du réseau décentralisé.
- SMA permet de prendre des décisions d'utilisation des ressources notamment le processus d'appariement entre les demandes et les offres. Il contient le portail d'application qui permet d'accéder aux services partagés en cloud. Le SMA est composé de sept agents qui nous permettent de représenter différentes évolutions dynamiques (ou trajectoires) et modifications dans le comportement des agents.

Ces trois modules sont reliés entre eux pour assurer la traçabilité et la flexibilité. De plus, les systèmes multi-agents offrent l'intégration du comportement des acteurs (le fournisseur et les clients, mais aussi l'évolution du marché) et donc une évolution dynamique. Le système multi-agent est composé de plusieurs agents, qui peuvent être cognitifs comme Decision Agent, Learning Agent (IA), Scheduling Agent (qui n'est pas responsable de la planification optimisée) et Market Agent ce qui permet de prendre des décisions concernant le partage ; et réactifs, comme Resource Agent, Enterprise Agent (le fournisseur et les clients), Intern Information Agent (avec toutes les données nécessaires) ce qui permet de gérer des informations, des connaissances, des règles, des paramétrages et des collectes de données, etc.

Dans le chapitre suivant, nous détaillons le processus d'appariement. Le processus d'appariement consiste en l'allocation des ressources offertes par une entreprise à plusieurs entreprises en présentant en détail ces agents et leur collaboration.

5. Service de partage – l'appariement

5.1. Introduction

Comme nous l'avons présenté dans le chapitre précédent, au sein de notre plateforme de partage, les interactions entre les entreprises sont supervisées par un système multi-agents et la gestion des ressources se fait à l'aide d'un réseau d'objets connectés managé par une blockchain de type consortium. Le partage effectif des ressources et leur affectation aux clients est réalisé via les agents définis. Dans ce chapitre, nous décrivons le processus d'appariement en présentant en détail ces agents. Le problème d'appariement consiste en l'allocation des ressources offertes par une entreprise à plusieurs entreprises sur la base de critères qui peuvent être très divers en fonction des objectifs visés. Dans notre travail, nous avons choisi de considérer la minimisation des coûts, l'adéquation entre la demande et l'offre et la maximisation du niveau de service. Un exemple numérique est proposé pour mettre en évidence notre proposition.

5.2. Appariement

Les interactions entre entreprises sont supervisées par un système multi-agents. Il est donc crucial de prendre en compte le comportement des parties prenantes et de leur organisation afin d'assurer l'efficacité du système de partage (Bai *et al.*, 2021). L'évaluation du comportement des acteurs est généralement modélisée par une approche orientée agent avec des agents qui peuvent être des agents économiques (théorie des jeux) et/ou des agents intelligents (Roy *et al.*, 2014). En effet, les SMA permettent d'automatiser les négociations même si le système est complexe et la théorie des jeux permet de décrire différents types de coopération avec des conflits d'intérêts possibles (Moghadam & Zarandi, 2021). Dans ce travail de thèse, nous avons proposé d'utiliser un schéma multi-agents pour définir des activités dynamiques et flexibles pour cette allocation, l'appariement (en anglais matching).

Le problème d'appariement est un problème largement connu dans la littérature qui consiste à définir sur la base d'objectifs (coûts, adéquation, qualité, etc.) les meilleurs appariements possibles (Cheng *et al.*, 2018). Une bonne étude sur les problèmes d'appariement avec les plateformes de fabrication en cloud est présentée dans (Delaram *et al.*, 2021). Dans notre proposition, nous définissons, à l'aide du SMA, une méthode qui consiste à intégrer les données du marché et les comportements des acteurs. En outre, il convient de noter que l'intégration du SMA dans notre plateforme nous aidera à centraliser puis optimiser la gestion des partages en

termes d'usages, de réallocations ou de modifications, mais aussi en termes de bénéfices économiques (Alli & Alam, 2020).

Le problème d'appariement consiste en l'allocation des ressources offertes par une entreprise à plusieurs entreprises sur la base généralement de la minimisation des coûts, de l'adéquation entre l'offre et la demande pour chaque acteur et de la maximisation du niveau de service. (Liu *et al.*, 2022).

Dans la figure 5.1, nous détaillons la procédure de « Decision Agent » complète et les liens entre les agents pour mieux comprendre le traitement de l'appariement.

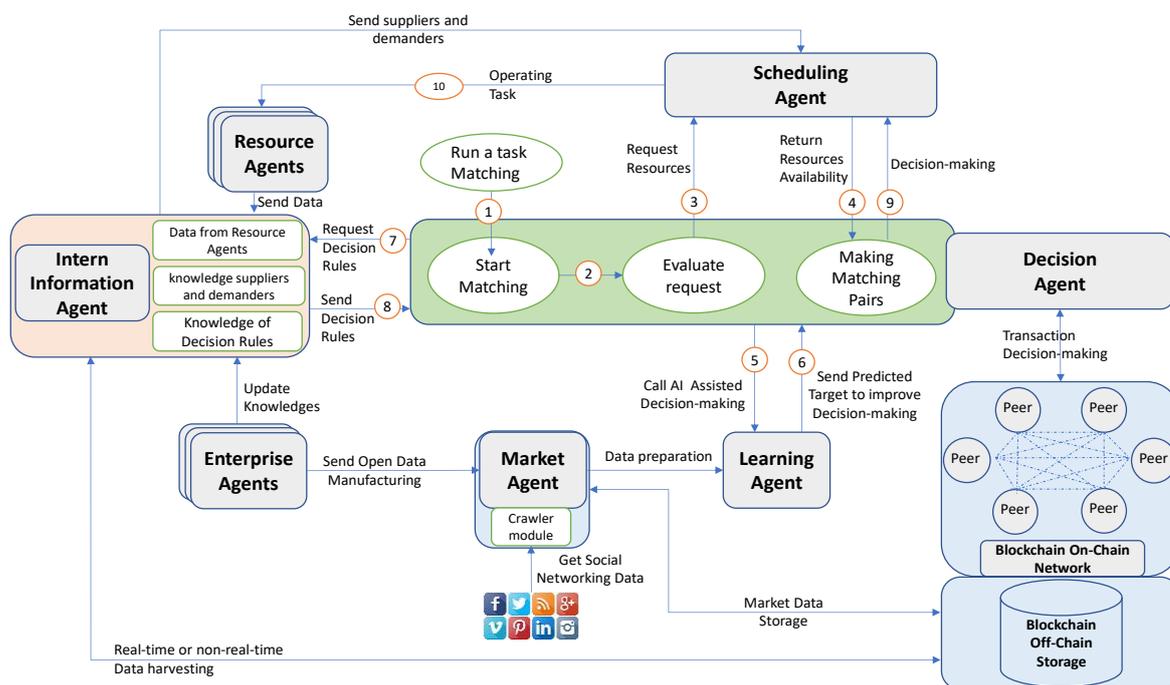


Figure 5.1 Le processus d'appariement. (Liu *et al.*, 2022)

Les procédures de traitement sont données par les 10 étapes décrites dans ce qui suit.

Étape 1 : Decision Agent qui permet de prendre des décisions d'utilisation des ressources, notamment de traiter un processus d'appariement entre des ressources d'un fournisseur et des ressources demandées par les entreprises clientes (à la demande de nombreux types de ressources industrielles partagées possibles selon les besoins des entreprises). L'idée est de lier des demandes en ressources aux meilleures ressources disponibles du point de vue des clients et de l'entreprise qui fournit les ressources. Decision Agent va piloter et communiquer avec d'autres agents pour réaliser la procédure de traitement d'appariement.

Étape 2 : Decision Agent va faire la mesure des ressources disponibles. Ces ressources disponibles sont dynamiques selon le traitement d'appariement. En effet, Scheduling Agent peut dynamiquement trier ces ressources disponibles et retourner une liste de ressources disponibles à Decision Agent. Nous présenterons notre problème d'appariement qui consistera à minimiser les coûts, maximiser l'adéquation entre la demande et l'offre pour chaque acteur, et à maximiser le niveau de service (Liu *et al.*, 2022). Decision Agent définira l'appariement optimal en fonction des demandes exprimées et des ressources offertes. Tout d'abord Decision Agent demande à Scheduling Agent de lui communiquer les ressources disponibles initiales. Si des traitements d'appariement sont en cours de réalisation, il va verrouiller les ressources fournisseur pour faire le processus d'appariement. Une fois le traitement d'appariement terminé, il va mettre à jour le statut de ces ressources fournisseur selon le résultat d'appariement obtenu. Si finalement l'appariement n'est pas réussi, il va libérer ces ressources fournisseur. Sinon il va mettre le statut d'apparié pour ces ressources fournisseur, et les supprimer de la liste des ressources disponibles.

Étape 3 : Decision Agent va demander à « Scheduling Agent » de classifier les ressources fournisseur disponibles selon des conditions prédéfinies (la disponibilité, le prix et le type de ressources, etc).

Étape 4 : Scheduling Agent va retourner des informations de classement des ressources disponibles triées (notamment une liste par type de ressources) à Decision Agent.

Étape 5 : Pour améliorer la prise de décision de l'appariement entre des ressources fournisseur et des ressources demandes aux entreprises, Decision Agent va lancer Learning Agent.

Étape 6 : Learning Agent va appliquer l'algorithme d'IA sélectionné (Machine Learning) pour analyser des données de Market Agent, et générer la cible prévue et le renvoyer à Decision Agent pour aider la prise de décision.

Étape 7 : Decision Agent va charger les connaissances de règles de décision dans Intern Information Agent.

Étape 8 : Intern Information Agent permet de renvoyer des connaissances de règles de décision pour le traitement d'appariement. Ces règles qui peuvent être, par exemple les poids correspondent à l'importance des attributs (prix, taux de service de ressources, taux de

priorité de demande, l'intervalle de taux de service accepté pour des demandes, etc.) pour les deux côtés, demandes et offres pour le traitement d'appariement.

Étape 9 : Decision Agent va prendre les règles de décision qui sont définies dans Intern Information Agent pour prendre la décision du choix de ressources et renvoyer la décision à Scheduling Agent. Ces règles de décision sont l'importance côté demande et fournisseur pour l'appariement bi-objectif, des attributs de chaque côté appliqués et des poids de chaque attribut pour les deux côtés etc. Et cette décision de choix de ressources va être stockée dans le réseau on-chain blockchain pour la sécurité et la traçabilité des données. Decision Agent va générer aussi une pré-facture (La préfacturation est assimilée à une facture proforma, un type de facture spécifique comparable à un devis) pour préparer le financement.

Étape 10 : Scheduling Agent va lancer l'opération de tâche à « Resource Agents » pour préparer des opérations de partages de ressources. Une fois les ressources partagées libérées, Decision Agent permet d'importer ou transmettre des factures électroniques pour les deux côtés clients et fournisseur.

En cas de panne de la ressource choisie, Decision Agent peut relancer la même procédure pour prendre une nouvelle décision de choix s'il y a encore des ressources fournisseur disponibles. Sinon, le système retourne une information d'échec d'appariement à l'entreprise qui demande des ressources.

5.3. Modélisation mathématique

5.3.1. Paramètres et variables

Offres

n	Nombre de ressources/services des offres
O_i	Offre i
$char_{avg_i}$	Caractéristique de l'offre O_i
p_i	Prix de vente de l'offre O_i , donné par unité de temps de l'opération.
SR_i	Indice de service de l'offre O_i
SR_{ij} O_i	Taux de service pour une demande spécifique D_j et une offre spécifique O_i
$SR_{ij_{max}}$	Taux de service maximal pour une demande spécifique D_j et une offre spécifique O_i

$SR_{ij_{min}}$	Taux de service minimum pour une demande spécifique D_j et une offre spécifique O_i
AT_i	Temps disponible de l'offre O_i
AT_{ij}	Temps disponible pour une demande précise D_j et une offre précise O_i
ATR_{ij}	Taux du temps d'affectation pour une demande spécifique D_j et une offre spécifique O_i
$ATR_{ij_{max}}$	Taux du temps d'affectation maximale pour une demande spécifique D_j et une offre spécifique O_i
$ATR_{ij_{min}}$	Taux du temps d'affectation minimum pour une demande spécifique D_j et une offre spécifique O_i
W_{OA1}	Poids de l'attribut de l'adéquation pour les offres
W_{OA2}	Poids de l'attribut de la notation d'attribution pour les offres
W_{OA3}	Poids de l'attribut de l'indice de priorité des demandes pour les offres
OCR_{1ij}	Taux corrélé d'adéquation pour les offres
OCR_{2ij}	Taux d'affectation corrélé pour les offres
OCR_{3ij}	Taux de corrélation de la priorité de la demande pour les offres
β_{ij}	Degré de satisfaction des offres
λ_2	Importance de la préférence du côté du fournisseur

Demandes

m	Nombre de ressources/services logistiques des besoins
D_j	Besoin j
$char_{maxj}$	Valeur maximale acceptable de la caractéristique souhaitée de la demande D_j
$char_{minj}$	Valeur minimale acceptable de la caractéristique souhaitée de la demande D_j
OT_j	Temps de fonctionnement de la demande D_j
OT_{ij}	Temps de fonctionnement pour une demande spécifique j et une offre spécifique O_i
p_{ij}	Prix pour une demande spécifique j et une offre spécifique O_i
PR_j	Indice de priorité de la demande de la demande D_j
PR_{ij}	Indice de priorité de la demande pour une demande spécifique D_j et une offre spécifique O_i
$PR_{ij_{max}}$	Indice maximal de priorité de la demande pour une demande spécifique D_j et une offre spécifique O_i

$PR_{ij_{min}}$	Indice Minimum de priorité de la demande pour une demande spécifique D_j et une offre spécifique O_i
C_{ij}	Coût pour une demande spécifique D_j et une offre spécifique O_i
$C_{ij_{max}}$	Coût maximal pour une demande spécifique D_j et une offre spécifique O_i
$C_{ij_{min}}$ O_i	Coût Minimum pour une demande spécifique D_j et une offre spécifique O_i
W_{DA1}	Poids de l'attribut d'adéquation pour les demandes
W_{DA2}	Poids de l'attribut de coût pour les demandes
W_{DA3}	Poids de l'attribut de taux de service de offres pour les demandes
$DCR1_{ij}$	Taux corrélé d'adéquation pour les demandes
$DCR2_{ij}$	Coût corrélé pour les demandes
$DCR3_{ij}$	Taux de service corrélé pour les demandes
α_{ij}	Degré de satisfaction des demandes
λl	Importance de la préférence du côté du client

5.3.2. Formulation

❖ Offre :

Nous considérons un fournisseur de ressources/services logistiques (Entreprise A). Cette entreprise A offre n ressources/services logistiques, avec une caractéristique donnée ($char_{avg_i}$) (avec i de 1 à n) qui décrit les ressources/services logistiques proposés. Pour chaque offre i , nous pourrions définir une note de service SR_i (avec i de 1 à n) et un prix de vente pi . AT_i est le temps disponible.

❖ Demande :

Nous avons m entreprises (Entreprise B_m) qui ont besoin d'une allocation spécifique en ressources/services logistiques (un besoin par entreprise B_m où nous pourrions définir m besoins avec un nombre d'entreprises inférieur à m). Chaque besoin est représenté par un temps d'exploitation (OT_j) (avec j de 1 à m) et un indice de priorité de la demande PR_j (avec j de 1 à m , une valeur maximale est la demande la plus prioritaire). La caractéristique souhaitée est identifiée par une valeur maximale (la meilleure option possible) : ($char_{max_j}$) (avec j de 1 à m) et une valeur minimale acceptable ($char_{min_j}$) (avec j de 1 à m).

❖ Hypothèses :

Nous supposons que les ressources/services logistiques sont un problème d'appariement similaire avec les mêmes types de ressources/services logistiques.

Tous les besoins peuvent être satisfaits, c'est-à-dire que $m \leq n$.

5.3.2.1. Transformation en taux corrélés (vision des clients)

❖ DCR1 (Taux corrélé d'adéquation pour les demandes)

Nous pouvons définir un paramètre (métrique de valeur), $DCR1ij$, pour mesurer l'adéquation entre une demande j (avec j de 1 à m) et les n offres représentées :

$$DCR1ij = \begin{cases} \frac{char_{avgi} - char_{minj}}{char_{maxj} - char_{minj}} & \text{si } char_{avgi} - char_{minj} > 0 \text{ et } char_{maxj} - char_{avgi} > 0 \\ \frac{\varepsilon}{char_{maxj} - char_{minj}} & \text{si } char_{avgi} - char_{minj} = 0 \text{ et } \varepsilon \text{ near } 0 \\ 1 & \text{si } char_{maxj} - char_{avgi} = 0 \\ char_{maxj} - char_{avgi} \leq char_{maxj} - char_{minj} & \\ char_{minj} \in \mathbb{N} * & \\ char_{maxj} \in \mathbb{N} * & \\ char_{avgi} \in \mathbb{N} * & \end{cases} \quad (1)$$

❖ DCR2 (Coût corrélé pour les demandes)

Soit le coût entre une demande j (avec j de 1 à m) et les n offres représentées par :

$$Cij = pij * OTij \quad (2)$$

Nous supposons que Cij_{min} est le minimum et que Cij_{max} est le maximum, le coût corrélé est donné par :

$$DCR2ij = \begin{cases} \frac{Cij - Cij_{min}}{Cij_{max} - Cij_{min}} & \text{si } Cij - Cij_{min} > 0 \text{ et } Cij_{max} - Cij > 0 \\ 0 & \text{si } Cij - Cij_{min} = 0 \\ 1 & \text{si } Cij_{max} - Cij = 0 \\ Cij \in \{Cij_{min}, Cij_{max}\} & \end{cases} \quad (3)$$

❖ DCR3 (Taux de service corrélé pour les demandes)

Le taux de service corrélée est donné par :

$$DCR3ij = \begin{cases} \frac{SRij - SRij_{min}}{SRij_{max} - SRij_{min}} & \text{si } SRij - SRij_{min} > 0 \text{ et } SRij_{max} - SRij > 0 \\ 0 & \text{si } SRij - SRij_{min} = 0 \\ 1 & \text{si } SRij_{max} - SRij = 0 \\ SRij \in \{SRij_{min}, SRij_{max}\} & \end{cases} \quad (4)$$

5.3.2.2. Transformation en taux corrélés (vision du fournisseur)

❖ OCR1 (Taux corrélé d'adéquation pour les offres)

Le taux de corrélation pour l'adéquation des offres est donné par :

$$OCR1_{ij} = \begin{cases} \frac{char_{maxj} - char_{avgi}}{char_{maxj} - char_{minj}} & \text{si } char_{avgi} - char_{minj} > 0 \text{ et } char_{maxj} - char_{avgi} > 0 \\ \frac{\varepsilon}{char_{maxj} - char_{minj}} & \text{si } char_{avgi} - char_{maxj} = 0 \text{ et } \varepsilon \text{ near } 0 \\ 1 & \text{si } char_{minj} - char_{avgi} = 0 \\ char_{maxj} - char_{avgi} \leq char_{maxj} - char_{minj} & \\ char_{minj} \in \mathbb{N} * & \\ char_{maxj} \in \mathbb{N} * & \\ char_{avgi} \in \mathbb{N} * & \end{cases} \quad (5)$$

❖ OCR2 (Taux d'affectation corrélé pour les offres)

Nous avons défini la notation du temps d'affectation comme ATR_{ij} :

$$ATR_{ij} = OT_{ij} / AT_{ij} \quad (6)$$

Nous supposons que $C_{ij_{min}}$ est le minimum du coût et $C_{ij_{max}}$ le maximum. La note d'affectation corrélée est donnée par :

$$OCR2_{ij} = \begin{cases} \frac{ATR_{ij} - ATR_{ij_{min}}}{ATR_{ij_{max}} - ATR_{ij_{min}}} & \text{si } ATR_{ij} - ATR_{ij_{min}} > 0 \text{ et } ATR_{ij_{max}} - C_{ij} > 0 \\ 0 & \text{si } ATR_{ij} - ATR_{ij_{min}} = 0 \\ 1 & \text{si } ATR_{ij_{max}} - ATR_{ij} = 0 \\ ATR_{ij} \in \{ATR_{ij_{min}}, ATR_{ij_{max}}\} & \end{cases} \quad (7)$$

❖ OCR3 (Taux de corrélation de la priorité de la demande pour les offres)

Le taux de corrélation de la priorité de la demande pour les offres est donné par :

$$OCR3_{ij} = \begin{cases} \frac{PR_{ij} - PR_{ij_{min}}}{SR_{ij_{max}} - SR_{ij_{min}}} & \text{si } PR_{ij} - PR_{ij_{min}} > 0 \text{ et } PR_{ij_{max}} - PR_{ij} > 0 \\ 0 & \text{si } PR_{ij} - PR_{ij_{min}} = 0 \\ 1 & \text{si } PR_{ij_{max}} - PR_{ij} = 0 \\ PR_{ij} \in \{PR_{ij_{min}}, PR_{ij_{max}}\} & \end{cases} \quad (8)$$

5.3.2.3. Fonction bi-objective du problème d'appariement

Ensuite, notre problème d'appariement avec bi-objectif est donné dans ce qui suit pour tous les appariements possibles notés $x_{ij} \forall i, j$:

$$x_{ij} = \begin{cases} 0 & \text{si la demande } i \text{ n'est pas appariée à l'offre } j \\ 1 & \text{si la demande } i \text{ est appariée à l'offre } j \end{cases} \quad (9)$$

Pour les demandes, le degré de satisfaction est α_{ij} :

$$\alpha_{ij} = W_{DA1} * DCR1ij + W_{DA2} * DCR2ij + W_{DA3} * DCR3ij \quad (10)$$

avec

$$\begin{cases} 0 \leq DCR1ij \leq 1 \text{ et } 0 \leq DCR2ij \leq 1 \text{ et } 0 \leq DCR3ij \leq 1 \\ W_{DA1} + W_{DA2} + W_{DA3} = 1 \end{cases} \quad (11)$$

L'objectif est alors de maximiser :

$$Max[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \alpha_{ij} \cdot x_{ij}] \quad (12)$$

Sujet à :

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^m x_{ij} \leq 1, \forall i \in \{1, \dots, n\} \\ \sum_{i=1}^n x_{ij} \leq 1, \forall j \in \{1, \dots, m\} \\ x_{ij} \in \{0,1\}, \forall i \in \{1, \dots, n\} \text{ et } \forall j \in \{1, \dots, m\} \end{cases} \quad (13)$$

Pour le fournisseur, le degré de satisfaction est β_{ij} :

$$\beta_{ij} = W_{OA1} * OCR1ij + W_{OA2} * OCR2ij + W_{OA3} * OCR3ij \quad (14)$$

avec

$$\begin{cases} 0 \leq OCR1ij \leq 1 \text{ et } 0 \leq OCR2ij \leq 1 \text{ et } 0 \leq OCR3ij \leq 1 \\ W_{OA1} + W_{OA2} + W_{OA3} = 1 \end{cases} \quad (15)$$

L'objectif est alors de maximiser :

$$Max[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \beta_{ij} \cdot x_{ij}] \quad (16)$$

Nous transformons ce modèle d'optimisation bi-objectif en un problème d'optimisation mono-objectif avec la méthode bien connue de scalarisation linéaire (Geoffrion, 1968 ; Ehrgott, 2005). Ainsi, nous pouvons identifier le meilleur problème d'allocation possible pour tous les besoins et toutes les offres en maximisant les valeurs de préférence (voir la figure 5.2).

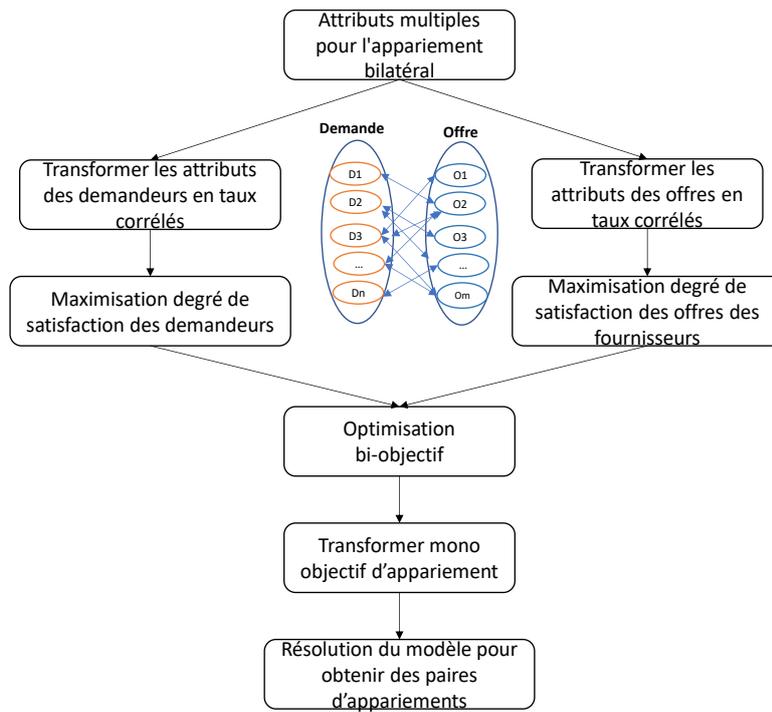


Figure 5.2 Le processus de transformation.

De cette manière, nous supposons que λ_1 et λ_2 représentent respectivement l'importance des fonctions objectifs données par les équations (12) et (16) avec $\lambda_1 + \lambda_2 = 1$. Notons F , le résultat du problème bi-objectif.

$$F = \text{Max} [\lambda_1 * \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \alpha_{ij} \cdot x_{ij} + \lambda_2 * \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \beta_{ij} \cdot x_{ij}] \quad (17)$$

Sujet à :

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^m x_{ij} \leq 1, \forall i \in \{1, \dots, n\} \\ \sum_{i=1}^n x_{ij} \leq 1, \forall j \in \{1, \dots, m\} \\ x_{ij} \in \{0,1\}, \forall i \in \{1, \dots, n\} \text{ et } \forall j \in \{1, \dots, m\} \\ \lambda_1 + \lambda_2 = 1 \end{cases} \quad (18)$$

Il faut noter que l'appariement proposé est simple, pour des types de ressources différents, des paramètres et des attributs peuvent être différents en adaptation avec leurs besoins particuliers. Donc il peut être étendu en considérant d'autres critères de sélection et surtout il devra être modifié par la suite afin d'intégrer dynamiquement les modifications des paramètres et des attributs de chaque côté (offre et demande) en ligne. Dans ce qui suit, nous allons présenter des résultats numériques pour un problème d'appariement.

Avant d'appliquer des algorithmes d'appariement pour résoudre ce problème, nous devons classer le degré de satisfaction du demandeur et le degré de satisfaction du fournisseur de l'offre pour obtenir des préférences.

Nous calculons à l'aide de l'équation (10) le degré de satisfaction du demandeur α_{ij} et par l'équation (14) le degré de satisfaction du fournisseur β_{ij} .

Nous classons le degré de satisfaction du demandeur α_{ij} pour obtenir la relation de préférence sur l'ensemble des offres du fournisseur pour chaque demandeur i .

Et nous classons aussi le degré de satisfaction du fournisseur β_{ij} pour obtenir la relation de préférence sur l'ensemble des demandeurs pour chaque offre j .

Dans ce qui suit, nous présentons des résultats numériques pour mettre en évidence notre proposition d'appariement.

5.4. Application numérique

5.4.1. Étude de cas 1 - Analyse de l'influence des paramètres

Nous considérons d'abord un scénario avec 8 offres (de $O1$ à $O8$) du fournisseur et 5 demandes (de $D1$ à $D5$) des clients.

Pour tester notre modèle d'appariement, nous générons des données aléatoires génériques. Pour les demandes, le degré de satisfaction α_{ij} (équation (10)) est donné dans le tableau 5.1. Dans ce cas, la valeur de l'appariement ($D1, O4$), égale à 0,78419, est la valeur maximale de la première colonne du tableau. Cela signifie que le couple ($D1, O4$) est le mieux adapté à la demande $D1$; inversement, la valeur du couple ($D1, O3$), égale à 0,14132, est la valeur minimale dans la première colonne du tableau 5.1. C'est le couple le moins bien adapté à la demande $D1$.

Tableau 5.1 Le degré de satisfaction de la demande (α_{ij})

α_{ij}	$D1$	$D2$	$D3$	$D4$	$D5$
$O1$	0,49622	0,47878	0,27967	0,49408	0,31994
$O2$	0,77545	0,69750	0,38496	0,73128	0,45268
$O3$	0,14132	0,14342	0,03250	0,15215	0,05846

<i>O4</i>	0,78419	0,70099	0,37165	0,73646	0,44246
<i>O5</i>	0,31295	0,30078	0,13344	0,31422	0,16905
<i>O6</i>	0,21814	0,19496	0,07912	0,21092	0,11223
<i>O7</i>	0,37706	0,35901	0,21515	0,37384	0,24985
<i>O8</i>	0,53781	0,51584	0,28951	0,53274	0,33379

Avec :

$$\begin{cases} W_{DA1} = 0,31 & \text{Poids de l'attribut d'adéquation pour les demandes} \\ W_{DA2} = 0,54 & \text{Poids de l'attribut de coût pour les demandes} \\ W_{DA3} = 0,15 & \text{Poids de l'attribut de taux de service de offres pour les demandes} \end{cases}$$

Pour les offres, le degré de satisfaction β_{ij} (équation (14)) est également donné dans le tableau 5.2. Par exemple, la valeur du couple (*O1*, *D1*) est égale à 0,71964 qui est la valeur maximale de la première ligne du tableau 5.2. Cela signifie que le couple (*O1*, *D1*) est le couple le mieux adapté à l'offre *O1*.

Tableau 5.2 Le degré de satisfaction de l'offre (β_{ij})

β_{ij}	<i>D1</i>	<i>D2</i>	<i>D3</i>	<i>D4</i>	<i>D5</i>
<i>O1</i>	0,71964	0,27976	0,19189	0,51323	0,39152
<i>O2</i>	0,81994	0,33241	0,20227	0,58208	0,42062
<i>O3</i>	0,92393	0,43825	0,56624	0,68785	0,49103
<i>O4</i>	0,46311	0,10024	0,10796	0,31293	0,27973
<i>O5</i>	0,58523	0,20754	0,16893	0,42498	0,34935
<i>O6</i>	0,85057	0,39890	0,25835	0,63851	0,46851
<i>O7</i>	0,97880	0,46957	0,27908	0,72609	0,50932
<i>O8</i>	0,84882	0,35977	0,21873	0,61000	0,43861

Avec :

$$\begin{cases} W_{OA1} = 0,11 & \text{Poids de l'attribut de l'adéquation pour les offres} \\ W_{OA2} = 0,66 & \text{Poids de l'attribut de la notation d'attribution pour les offres} \\ W_{OA3} = 0,23 & \text{Poids de l'attribut de l'indice de priorité des demandes pour les offres} \end{cases}$$

Nous simulons notre modèle d'appariement à l'aide du logiciel CPLEX avec un ordinateur portable avec son processeur Intel Core i7-1165G7 et ses 16 Go de mémoire. Les paires satisfaites et appariées des résultats de la simulation sont $\{(O2, D1), (O3, D3), (O4, D2), (O7, D5), (O8, D4)\}$ dans le cas ($\lambda1=0,51$ and $\lambda2=0,49$). Le temps d'exécution est très faible (pour tous les cas par exemple moins de deux secondes), c'est pourquoi nous ne les comparons pas.

La valeur de l'équation (17) associée aux contraintes données dans l'équation (18) dans ce cas est égale à $F=2,4454929$.

Afin de voir si ce résultat est intéressant, nous pouvons le comparer au résultat idéal F^* , obtenu en supposant que de chaque côté (offre et demande), nous avons obtenu les meilleurs couples possibles, et le pire résultat possible, F' .

Ainsi, nous obtenons la valeur maximale des demandes égale à 2,5664 (équation (12)) avec les "paires appariées" : $\{(O1, D5), (O2, D4), (O4, D1), (O7, D3), (O8, D2)\}$. De même, du côté de l'offre, la valeur maximale pouvant être obtenue est 2,97456 (équation (16)) avec les paires appariées : $\{(O2, D5), (O3, D3), (O6, D2), (O7, D1), (O8, D4)\}$. Alors :

$$F^* = 2,5664*0,51 + 2,97456*0,49 = 2,7663984$$

Au meilleur résultat pour la demande, correspond le pire pour l'offre : 2,07556 (équation 16), et inversement, au pire résultat pour la demande : 1,58994 (équation (12)). Alors :

$$F' = 1,58994*0,51 + 2,07556*0,49 = 1,8778938$$

En considérant cet intervalle absolu min/max (F'/F^*), nous constatons que le F obtenu se situe à 63,9% de celui-ci, c'est-à-dire environ 14% plus près de F^* que de F' .

Enfin, nous comparons plusieurs scénarios pour analyser l'influence des paramètres "importance de la préférence" ($\lambda1$ et $\lambda2$). Nous choisissons le nombre de besoins égal au nombre d'offres ($m=n$) dans les scénarios multiples (voir le tableau 5.3).

Nous pourrions définir la valeur du caractère aléatoire pour $\lambda1$ et $\lambda2$ dans le tableau 5.3.

Tableau 5.3 Liste de la valeur du caractère aléatoire pour $\lambda1$ et $\lambda2$

$\lambda1$	0,01	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,99
$\lambda2$	0,99	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0,01

Afin de faciliter la comparaison des résultats, nous définissons l'équation (19) qui permet de calculer la moyenne des valeurs de la fonction objectif pour chaque couple entre offres et besoins. Notons AF , (La valeur F est définie par l'équation (17)).

$$AF = F/m \quad (19)$$

avec $m=n$.

Nous donnons les impacts de la moyenne des valeurs de la fonction objectif (AF) entre les offres et les besoins dans la figure 5.3 pour estimer les impacts ($\lambda_2 = 1 - \lambda_1$).

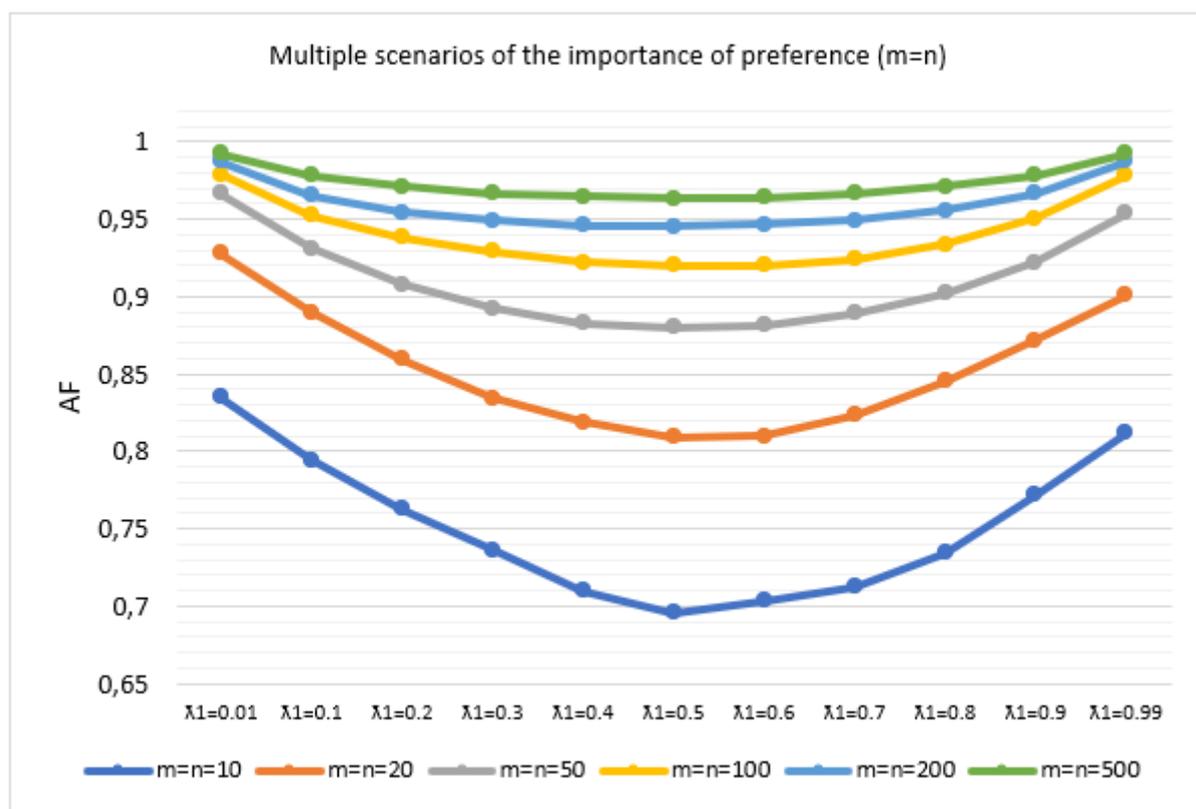


Figure 5.3 Impact de la moyenne des valeurs de la fonction objectif (AF) entre les offres et les besoins ($m = n$).

De cette étude, nous pouvons retenir que se concentrer exclusivement sur les offres ($\lambda_2=0,99$) ou les besoins ($\lambda_1=0,99$) donne toujours un meilleur résultat pour l' AF . En effet, un compromis ($\lambda_1=0,50$, $\lambda_2=0,50$) est souvent moins avantageux pour chacune des parties mais équilibre au mieux leurs gains respectifs.

Nous choisissons un nombre de besoins égal au nombre d'offres ($2*m = n$) dans le cas de scénarios multiples. Nous donnons les impacts de la moyenne des valeurs de la fonction objectif (AF) entre les offres et les besoins dans la figure 5.4 pour estimer les impacts ($\lambda_2 = 1 - \lambda_1$).

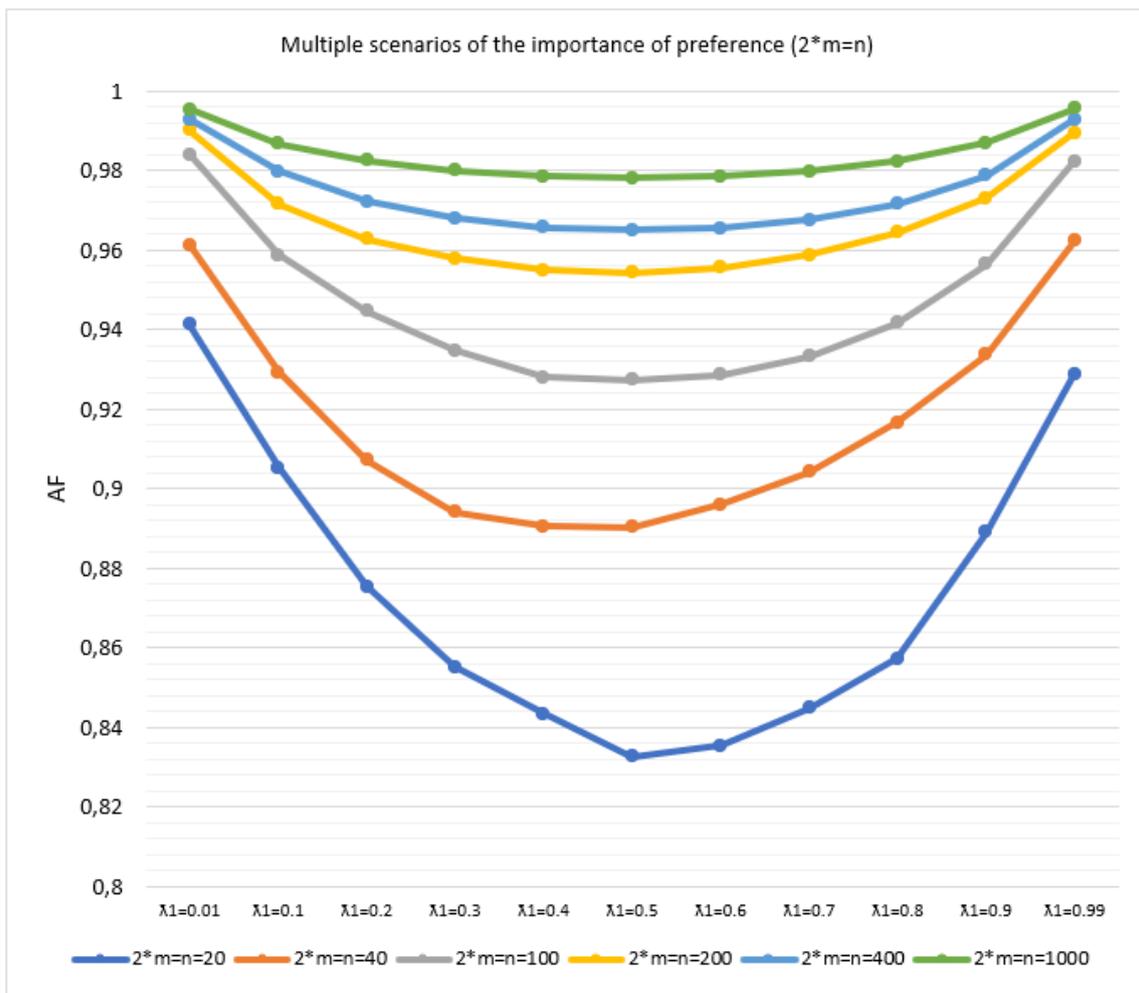


Figure 5.4 Impact de la moyenne des valeurs de la fonction objectif (AF) entre les offres et les besoins ($2*m = n$).

Nous choisissons un nombre de besoins égal au nombre d'offres ($10*m = n$) dans le cas de scénarios multiples. Nous donnons les impacts de la moyenne des valeurs de la fonction objectif (AF) entre les offres et les besoins dans la figure 5.5 pour estimer les impacts ($\lambda_2 = 1 - \lambda_1$).

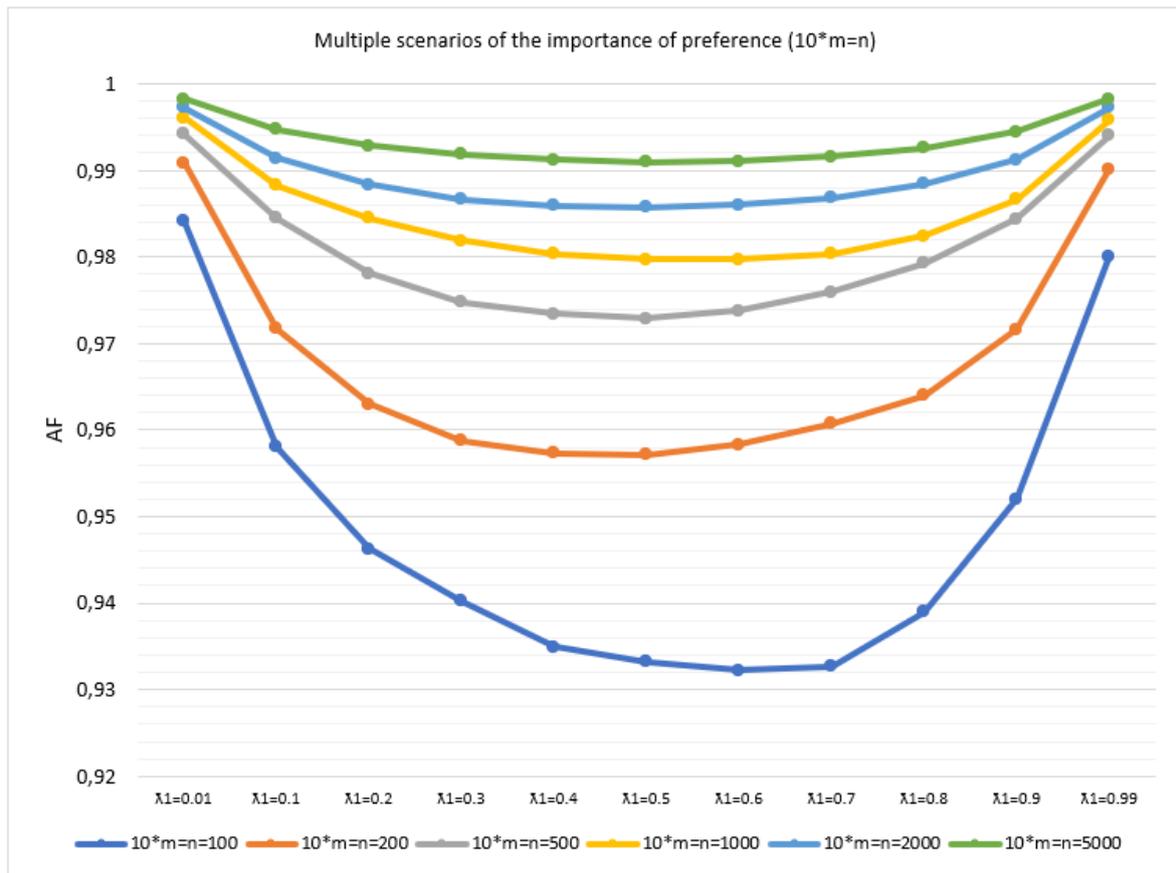


Figure 5.5 Impact de la moyenne des valeurs de la fonction objectif (AF) entre les offres et les besoins ($10^*m = n$).

Après avoir comparé différents scénarios ($m=n$ dans la figure 5.3, $2^*m=n$ dans la figure 5.4 et $10^*m=n$ dans la figure 5.5), nous pouvons constater que, plus le nombre de paires possibles est élevé (m/n), plus la différence entre les résultats des compromis et des considérations exclusives est faible. Cela vient simplement du fait qu'un grand nombre de possibilités permet de lisser au mieux les correspondances.

5.4.2. Étude de cas 2 - Utilité attendue sous différents algorithmes de résolution

Nous pouvons citer par exemple les différents scénarios de l'utilité attendue sous différents algorithmes de résolution. L'algorithme Gale-Shapley (GS) proposé par David Gale et Lloyd Shapley en 1962 (Gale & Shapley, 1962) qui peut être utilisé pour trouver un appariement stable pour l'admission au collège et la stabilité dans le contexte du mariage ou encore Robert W. Irving qui a développé en 1985 l'algorithme Irving's (IR) efficace pour résoudre le problème des colocataires stables. Il s'agit de l'extension de l'algorithme GS pour résoudre le problème de la recherche d'un appariement stable (Irving, 1985). L'algorithme Top Trading Cycles (TTC)

a été développé pour la première fois par Lloyd Shapley et Herbert Scarf (1974) (Shapley & Scarf, 1974). Abdulkadiroglu et Sonmez (Abdulkadiroglu & Sonmez, 2003) ont proposé de l'utiliser dans un environnement d'appariement bilatéral. Top trading cycles (TTC) est un algorithme qui peut être utilisé pour trouver l'appariement stable dans le problème de l'allocation des maisons et de l'appariement des étudiants aux écoles, etc. L'algorithme de Kuhn-Munkres (KM) a été développé et publié en 1955 par Harold Kuhn, et revu par James Munkres en 1957, et permet de résoudre la méthode de scalarisation linéaire (Kuhn, 1955 ; Munkres, 1957). Les algorithmes de résolution d'appariement sont données en Annexe.

Nous considérons d'abord un scénario avec 10 offres (de $O1$ à $O10$) du fournisseur et 10 demandes (de $D1$ à $D10$) des clients. Scheduling Agent détermine le même nombre de demandes et d'offres avant de déclencher le processus d'appariement.

Pour tester notre modèle d'appariement, nous générons des données aléatoires génériques. Pour les demandes, le degré de satisfaction α_{ij} (équation (10)) est donné dans le tableau 5.4. Dans ce cas, la valeur de l'appariement ($D1, O8$), égale à 0,73253, est la valeur maximale de la première ligne du tableau. Cela signifie que le couple ($D1, O8$) est le mieux apparié pour la demande $D1$; inversement, la valeur du couple ($D1, O3$), égale à 0,14958, est la valeur minimale dans la première colonne du tableau 5.4. C'est le couple le moins bien adapté à la demande $D1$.

Tableau 5.4 Le degré de satisfaction de la demande (α_{ij})

α_{ij}	$D1$	$D2$	$D3$	$D4$	$D5$	$D6$	$D7$	$D8$	$D9$	$D10$
$O1$	0,49011	0,48277	0,31528	0,50968	0,34633	0,44908	0,48251	0,28344	0,50546	0,45928
$O2$	0,64564	0,57347	0,33324	0,63101	0,38673	0,50890	0,62700	0,28733	0,60524	0,56138
$O3$	0,14958	0,17041	0,06053	0,18107	0,07908	0,16810	0,14420	0,04055	0,19354	0,14787
$O4$	0,70683	0,64976	0,38560	0,70481	0,43803	0,56405	0,69480	0,33376	0,67248	0,62571
$O5$	0,28898	0,29376	0,14505	0,31435	0,17136	0,26943	0,28292	0,11700	0,31562	0,26931
$O6$	0,32409	0,37861	0,23356	0,38162	0,24797	0,34184	0,33165	0,20456	0,38467	0,33354
$O7$	0,40611	0,41174	0,27740	0,43041	0,30205	0,39712	0,39887	0,25256	0,43576	0,39020
$O8$	0,73253	0,65356	0,39136	0,71594	0,44868	0,57581	0,71415	0,34075	0,68385	0,63940
$O9$	0,38016	0,32819	0,28683	0,37168	0,19271	0,30070	0,36104	0,11765	0,36384	0,32157

<i>O10</i>	0,35088	0,29751	0,14273	0,33886	0,18315	0,28649	0,32908	0,11540	0,33755	0,29677
------------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------

Avec :

$$\begin{cases} W_{DA1} = 0,37 & \text{Poids de l'attribut d'adéquation pour les demandes} \\ W_{DA2} = 0,45 & \text{Poids de l'attribut de coût pour les demandes} \\ W_{DA3} = 0,18 & \text{Poids de l'attribut de taux de service de offres pour les demandes} \end{cases}$$

Pour les offres, le degré de satisfaction β_{ij} (équation (14)) est également donné dans le tableau 5.5. Par exemple, la valeur du couple (*O1*, *D1*) est égale à 0.68005 qui est la valeur maximale de la première ligne du tableau 5.5. Cela signifie que le couple (*O1*, *D1*) est le couple le mieux adapté à l'offre *O1*.

Tableau 5.5 Le degré de satisfaction de l'offre (β_{ij})

β_{ij}	<i>D1</i>	<i>D2</i>	<i>D3</i>	<i>D4</i>	<i>D5</i>	<i>D6</i>	<i>D7</i>	<i>D8</i>	<i>D9</i>	<i>D10</i>
<i>O1</i>	0,68005	0,30490	0,30878	0,48763	0,43758	0,31720	0,54841	0,32389	0,41084	0,45880
<i>O2</i>	0,76463	0,32031	0,29981	0,52967	0,44715	0,33655	0,61597	0,31190	0,44497	0,49851
<i>O3</i>	0,87727	0,45929	0,64101	0,66391	0,54567	0,44109	0,73980	0,40307	0,56877	0,61741
<i>O4</i>	0,43658	0,09665	0,17871	0,25834	0,29138	0,15252	0,30712	0,21017	0,20422	0,25317
<i>O5</i>	0,61246	0,27903	0,30305	0,44508	0,42013	0,29273	0,49057	0,32120	0,37462	0,41953
<i>O6</i>	0,74761	0,31876	0,30310	0,52225	0,44635	0,33370	0,60283	0,31573	0,43914	0,49139
<i>O7</i>	0,92289	0,46886	0,39689	0,68742	0,55173	0,45236	0,77659	0,39774	0,58801	0,63953
<i>O8</i>	0,75599	0,29550	0,27863	0,51003	0,42935	0,31912	0,60244	0,29211	0,42612	0,48151
<i>O9</i>	0,73629	0,36036	0,34582	0,54545	0,47669	0,36013	0,60626	0,35681	0,46345	0,51041
<i>O10</i>	0,68949	0,36212	0,36057	0,52899	0,47884	0,35627	0,57183	0,37274	0,45137	0,49418

Avec :

$$\begin{cases} W_{OA1} = 0,32 & \text{Poids de l'attribut de l'adéquation pour les offres} \\ W_{OA2} = 0,55 & \text{Poids de l'attribut de la notation d'attribution pour les offres} \\ W_{OA3} = 0,13 & \text{Poids de l'attribut de l'indice de priorité des demandes pour les offres} \end{cases}$$

L'influence des algorithmes

Nous simulons notre modèle d'appariement à l'aide du langage de programmation R avec un ordinateur portable avec son processeur Intel Core i7-1165G7 et ses 16 Go de mémoire. Le temps d'exécution est très faible (pour tous par exemple moins de deux secondes), c'est pourquoi nous ne les comparons pas.

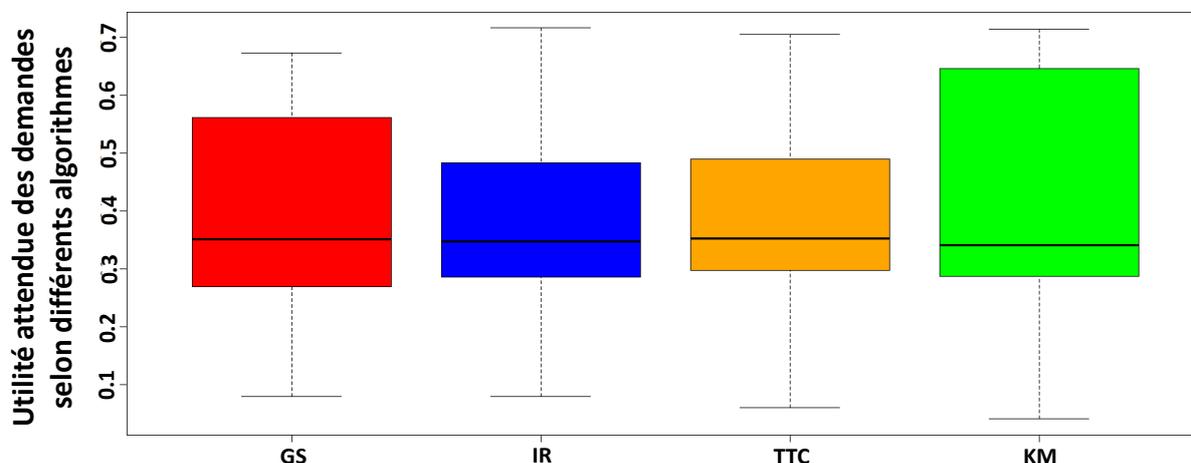


Figure 5.6 Utilité attendue des demandes selon différents algorithmes.

Nous donnons la distribution de l'utilité pour les demandes ($\lambda_1 = 1, \lambda_2 = 0$) qui sont déterminées par les paires d'appariement après comparaison des algorithmes (GS, IR, TTC et KM) dans la figure 5.6.

Tableau 5.6 Les paires appariées pour les demandes ($\lambda_1 = 1, \lambda_2 = 0$) par des algorithmes de comparaison

Algorithmes	GS		IR		TTC		KM	
	Paires appariées	Utilité						
Résultats de la simulation	(O1, D3)	0,31528	(O1, D2)	0,48277	(O1, D1)	0,49011	(O1, D9)	0,50546
	(O2, D10)	0,56138	(O2, D1)	0,64564	(O2, D2)	0,57347	(O2, D1)	0,64564
	(O3, D5)	0,07908	(O3, D5)	0,07908	(O3, D3)	0,06053	(O3, D8)	0,04055
	(O4, D9)	0,67248	(O4, D8)	0,33376	(O4, D4)	0,70481	(O4, D4)	0,70481
	(O5, D6)	0,26943	(O5, D3)	0,14505	(O5, D5)	0,17136	(O5, D6)	0,26943
	(O6, D7)	0,33165	(O6, D10)	0,33354	(O6, D6)	0,34184	(O6, D2)	0,37861
	(O7, D1)	0,40611	(O7, D9)	0,43576	(O7, D7)	0,39887	(O7, D5)	0,30205
	(O8, D2)	0,65356	(O8, D4)	0,71594	(O8, D8)	0,34075	(O8, D7)	0,71415
	(O9, D4)	0,37168	(O9, D7)	0,36104	(O9, D9)	0,36384	(O9, D3)	0,28683
	(O10, D8)	0,11540	(O10, D6)	0,28649	(O10, D10)	0,29677	(O10, D10)	0,29677
Valeurs EF [u_{ij}] (L'équation (17))	3,77605		3,81907		3,74235		4,14430	

Nous donnons la distribution de l'utilité pour les offres ($\lambda_1 = 0, \lambda_2 = 1$) que déterminent les paires d'appariement après comparaison des algorithmes (GS, IR, TTC et KM) à la figure 5.7.

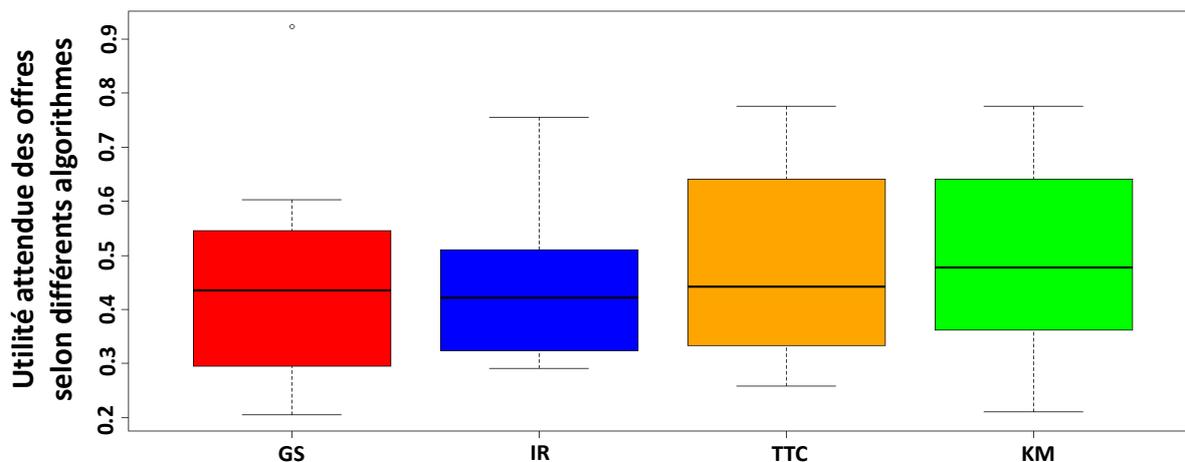


Figure 5.7 Utilité attendue des offres selon différents algorithmes.

Tableau 5.7 Les paires appariées d'offres ($\lambda_1 = 0, \lambda_2 = 1$) par des algorithmes de comparaison

Algorithmes	GS		IR		TTC		KM	
Résultats de la simulation	Paires appariées	Utilité						
	(O1, D8)	0,30878	(O1, D8)	0,32389	(O1, D8)	0,32389	(O1, D6)	0,31720
	(O2, D5)	0,49851	(O2, D6)	0,33655	(O2, D10)	0,49851	(O2, D4)	0,52967
	(O3, D2)	0,54567	(O3, D7)	0,73980	(O3, D3)	0,64101	(O3, D3)	0,64101
	(O4, D10)	0,20422	(O4, D5)	0,29138	(O4, D4)	0,25834	(O4, D8)	0,21017
	(O5, D9)	0,29273	(O5, D4)	0,44508	(O5, D5)	0,42013	(O5, D5)	0,42013
	(O6, D6)	0,60283	(O6, D2)	0,31876	(O6, D6)	0,33370	(O6, D10)	0,49139
	(O7, D1)	0,92289	(O7, D3)	0,39689	(O7, D7)	0,77659	(O7, D7)	0,77659
	(O8, D7)	0,29550	(O8, D1)	0,75599	(O8, D1)	0,75599	(O8, D1)	0,75599
	(O9, D4)	0,54545	(O9, D10)	0,51041	(O9, D9)	0,46345	(O9, D9)	0,46345
	(O10, D3)	0,37274	(O10, D9)	0,45137	(O10, D2)	0,36212	(O10, D2)	0,36212
Valeurs EF [u_{ij}] (L'équation (17))	4,58932		4,57012		4,83373		4,96772	

Nous donnons la distribution de l'utilité pour les demandes et les offres comme objectif unique ($\lambda_1 = \lambda_2 = 0,5$) en comparant les algorithmes (GS, IR, TTC et KM) dans la figure 5.8.

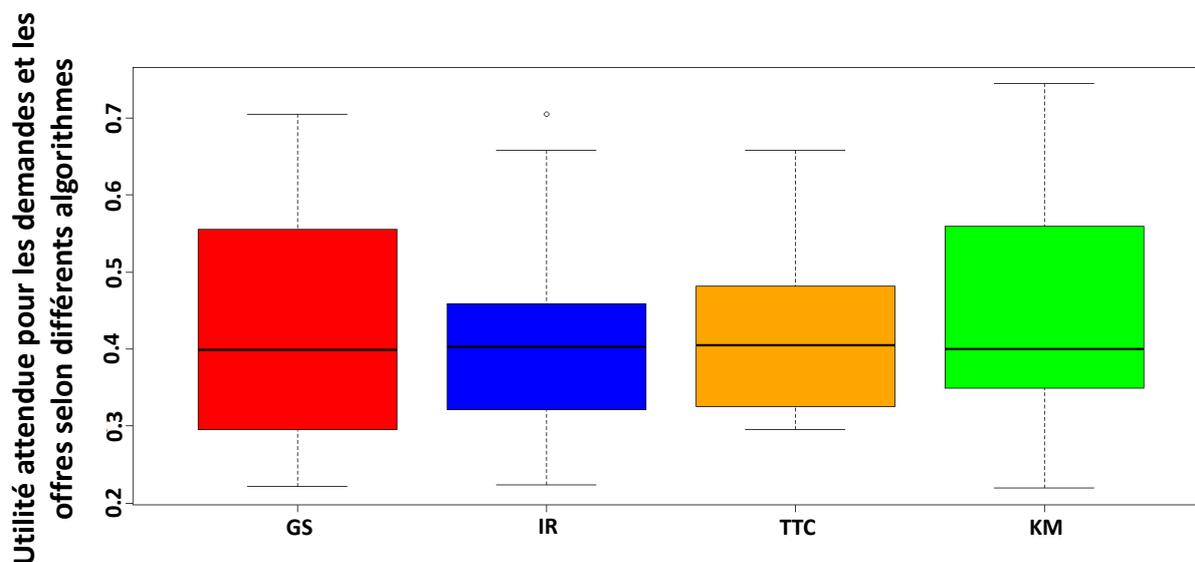


Figure 5.8 Utilité attendue pour les demandes et les offres selon différents algorithmes.

Tableau 5.8 Les paires appariées de demandes et d'offres comme objectif unique ($\lambda_1 = \lambda_2 = 0,5$) par des algorithmes de comparaison

Algorithmes	GS		IR		TTC		KM	
Résultats de la simulation	Paires appariées	Utilité	Paires appariées	Utilité	Paires appariées	Utilité	Paires appariées	Utilité
	(O1, D10)	0,45904	(O1, D2)	0,39384	(O1, D1)	0,58508	(O1, D6)	0,38314
	(O2, D1)	0,70514	(O2, D1)	0,70514	(O2, D2)	0,44689	(O2, D7)	0,62149
	(O3, D8)	0,22181	(O3, D5)	0,31238	(O3, D3)	0,35077	(O3, D3)	0,35077
	(O4, D3)	0,28216	(O4, D9)	0,43835	(O4, D4)	0,48158	(O4, D9)	0,43835
	(O5, D5)	0,29575	(O5, D3)	0,22405	(O5, D5)	0,29575	(O5, D8)	0,21910
	(O6, D6)	0,33777	(O6, D10)	0,41247	(O6, D6)	0,29575	(O6, D2)	0,34869
	(O7, D4)	0,55892	(O7, D8)	0,32515	(O7, D8)	0,32515	(O7, D4)	0,55892
	(O8, D9)	0,55499	(O8, D7)	0,65830	(O8, D7)	0,65830	(O8, D1)	0,74426
	(O9, D7)	0,48365	(O9, D4)	0,45857	(O9, D9)	0,41365	(O9, D10)	0,41599
(O10, D2)	0,32982	(O10, D6)	0,32138	(O10, D10)	0,39548	(O10, D5)	0,33100	
Valeurs EF [u_{ij}] (L'équation (17))	4,22905		4,24963		4,24840		4,41171	

Nous donnons les impacts de plusieurs scénarios de l'utilité attendue sous différents algorithmes dans la figure 5.9 pour estimer les impacts entre les algorithmes et la définition de l'objectif.

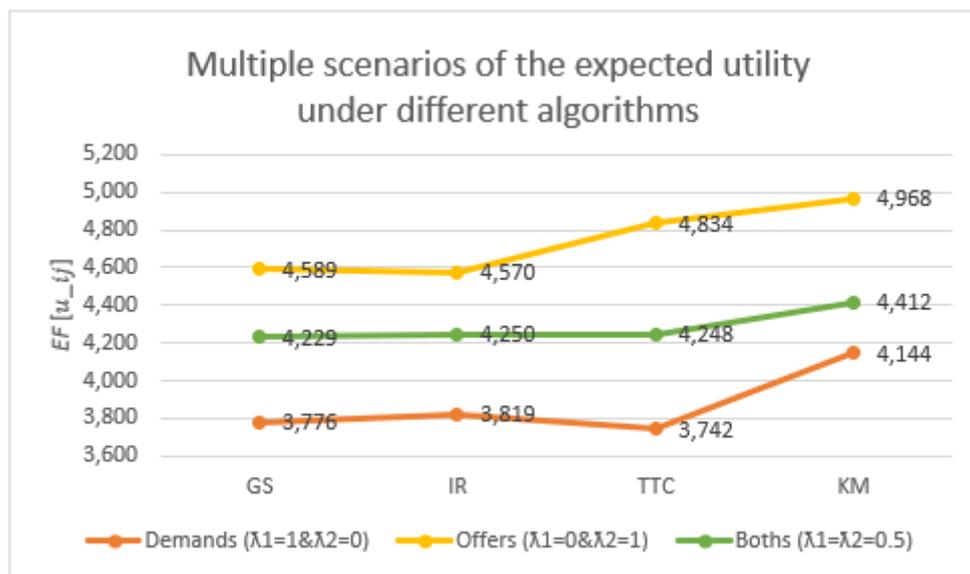


Figure 5.9 Scénarios multiples de l'utilité attendue sous différents algorithmes.

Après avoir comparé les différents algorithmes dans les figures 5.6-5.8, les unités attendues sont différentes selon que l'on se place côté offre ou demande. Par contre, cela n'impacte pas l'effet des algorithmes pour résoudre le modèle d'appariement. De plus, en comparant GS et IR dans la figure 5.9, nous observons que l'utilité totale de GS et IR est presque similaire. La valeur de l'utilité totale est très stable pour ces 3 scénarios (demandes unilatérales, offre unilatérale et deux côtés des deux). L'algorithme TTC est très différent dans ces 3 scénarios. Nous observons que l'algorithme KM maximise la valeur de l'utilité totale pour ces 3 scénarios. Ainsi, nous pouvons noter que l'algorithme KM est le meilleur algorithme pour l'optimisation de la maximisation avec un objectif différent pour résoudre notre modèle d'appariement (Nombre de demandes = Nombre d'offres).

Tableau 5.9 Les paires appariées avec un objectif différent (algorithme KM pour résoudre la maximisation de l'appariement modèle)

Cas	Cas A (La valeur maximale des demandes) ($\lambda_1 = 1, \lambda_2 = 0$)	Cas B (La valeur maximale des offres) ($\lambda_1 = 0, \lambda_2 = 1$)	Cas C (La valeur maximale de l'équilibre entre les demandes et les offres) ($\lambda_1 = 0,5, \lambda_2 = 0,5$)

Paires appariées	(O1, D9)	(O1, D6)	(O1, D6)
	(O2, D1)	(O2, D4)	(O2, D7)
	(O3, D8)	(O3, D3)	(O3, D3)
	(O4, D4)	(O4, D8)	(O4, D9)
	(O5, D6)	(O5, D5)	(O5, D8)
	(O6, D2)	(O6, D10)	(O6, D2)
	(O7, D5)	(O7, D7)	(O7, D4)
	(O8, D7)	(O8, D1)	(O8, D1)
	(O9, D3)	(O9, D9)	(O9, D10)
	(O10, D10)	(O10, D2)	(O10, D5)
Valeurs $EF [u_{ij}]$ (L'équation (17))	4,14430	4,96772	4,41171

Enfin pour voir si ce résultat est intéressant, nous pouvons le comparer au résultat idéal, mais impossible, $EF [u_{ij}]^*$, obtenu en supposant que de chaque côté (offre et demande), nous aurions obtenu les meilleures paires possibles, et le pire résultat possible, F' .

Ainsi, nous obtenons la valeur maximale pour les demandes (cas A) égale à 4,14430 (équation (12)) avec les paires appariées : $\{(O1, D2), (O2, D6), (O3, D9), (O4, D4), (O5, D7), (O6, D5), (O7, D8), (O8, D3), (O9, D1), (O10, D10)\}$. De même, du côté de l'offre (cas B), la valeur maximale pouvant être obtenue est de 4,80542 (équation (16)) avec les paires appariées : $\{(O1, D8), (O2, D10), (O3, D3), (O4, D2), (O5, D5), (O6, D1), (O7, D7), (O8, D4), (O9, D9), (O10, D6)\}$. Alors :

$$EF [u_{ij}]^* = 4,14430 * 0,50 + 4,96772 * 0,50 = 4,55601$$

Au meilleur résultat pour la demande, correspond le pire pour l'offre : 4,44254 (équation (16)), et inversement, au pire résultat pour la demande : 3,77203 (équation (12)). Alors :

$$EF [u_{ij}]' = 3,77203 * 0,50 + 4,44254 * 0,50 = 4,107285$$

Si nous considérons cet intervalle absolu min/max ($EF [u_{ij}]' / EF [u_{ij}]^*$), nous constatons que la $EF [u_{ij}]$ obtenue se situe à 67,8% de cet intervalle, ce qui signifie qu'elle est environ 18% plus proche de la $EF [u_{ij}]^*$ que de la $EF [u_{ij}]'$.

La valeur de l'équation (17) sous les contraintes données dans l'équation (18) dans le cas C, est égale à $F=4,41171$.

5.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons détaillé le processus d'appariement. Le processus d'appariement consiste en l'allocation des ressources offertes par une entreprise à plusieurs entreprises en présentant en détail ces agents et leur collaboration sur le SMA. Le SMA permet de prendre des décisions d'utilisation des ressources notamment le processus d'appariement entre les demandes et les offres. Le processus d'appariement permet de partager les ressources sur la base des choix de nos agents. Ce processus d'appariement considère notamment la minimisation des coûts, l'adéquation entre la demande et l'offre pour chaque acteur et la maximisation du niveau de service. D'autres critères pourraient être facilement considérés ou ajoutés à notre modèle. Nous obtenons un problème bi-objectifs ou multi-objectif simplifié en un seul objectif par la méthode de scalarisation linéaire.

Une application numérique est proposée pour mettre en évidence le problème d'appariement considéré. Après un examen approfondi, il n'existe pas d'appariement parfait pour tous les scénarios. Nous pouvons équilibrer l'importance du besoin et de l'offre grâce aux paramètres λ_1 et λ_2 de notre modèle d'appariement pour répondre à nos besoins. De plus, nous avons comparé les différents scénarios de l'utilité attendue sous différents algorithmes de résolution. Après avoir comparé les différents algorithmes, les unités attendues sont différentes selon que l'on se place côté offre ou demande. Finalement cela n'impacte pas l'effet des algorithmes pour résoudre le modèle d'appariement. Nous avons noté que l'algorithme KM est le meilleur algorithme pour l'optimisation de la maximisation avec un objectif différent pour résoudre notre modèle d'appariement.

Nous concluons ce chapitre en indiquant les prochaines étapes de nos recherches. Tout d'abord, le problème d'appariement devrait être étendu pour prendre en compte différents critères et d'éventuelles modifications en ligne. Le problème d'ordonnement devrait être défini sur la base des appariements optimaux obtenus.

6. Conclusion Globale et Perspectives

6.1. Conclusions sur le travail mené

Dans ce travail de thèse, nous proposons de nouvelles stratégies et méthodes qui permettent d'adapter le partage de ressources au contexte actuel. Nous avons présenté une plateforme en cloud dédiée au partage de ressources industrielles entre entreprises. Les interactions entre ces entreprises sont supervisées par un système multi-agents et la gestion des ressources se fait à l'aide d'un réseau de l'Internet d'objets connectés et d'une blockchain.

Dans le deuxième chapitre, nous avons étudié le principe du partage de ressources dans le contexte d'économie de partage. Nous avons fait une évaluation des différentes approches et des évolutions pour un renouveau des pratiques du partage de ressources. L'évaluation du partage de ressources numériques est très importante suite à la révolution des technologies dans le contexte des industries 4.0 et 5.0. En effet, cette évolution permet de développer de nouvelles stratégies et méthodes en assurant la création de nouveaux modèles d'entreprise et de services tel que les plateformes numériques de partage.

Dans le troisième chapitre, nous avons présenté les éléments clés pour la prise de décision du partage permettent d'avoir une vision globale sur l'aspect décisionnel du partage de ressources entre entreprises. Nous proposons le modèle de stratégies de partage basé sur la théorie des jeux permettant d'identifier facilement les comportements des individus pendant le partage. Enfin nous avons donné un exemple d'entrepôt mutualisé qui est un cas du partage de ressources industrielles. Nous mettons en place des ressources connectées pour les entreprises qui participent au partage ce qui permettra d'identifier facilement les comportements d'individus pendant le cycle du partage pour prendre la décision du partage de ressources, permettant ainsi d'atteindre les objectifs d'augmenter les profits fournisseurs et satisfaire leurs clients.

L'essence de l'économie de partage est de changer la transaction de la propriété vers le droit d'utilisation, et nous espérons que les personnes qui ont des ressources inutilisées et ceux qui ont besoin d'utiliser ces ressources peuvent effectuer des transactions point à point à faible coût.

Dans le quatrième chapitre, nous avons proposé la plateforme numérique de partage. Dans la plateforme proposée, notre réseau d'objets connectés est composé de chacun des éléments physiques pouvant être partagés. Chaque activité pouvant être partagée est ainsi identifiée et

peut être connectée via un réseau d'objets connectés. La blockchain est alors utilisée afin d'assurer l'enregistrement et la validation des transactions (les transactions correspondent à l'utilisation de ressources ou/et d'espaces). Cette blockchain est elle-même constituée d'un réseau de nœuds qui permet de sécuriser les données du réseau et des acteurs, ainsi que de gérer l'utilisation du réseau décentralisé, d'exécuter et d'enregistrer les transactions.

Cette architecture de plateforme de partage d'entreprise qui contient trois modules, notamment : le système physique d'IoT qui permet de collecter les données ; La blockchain qui permet de sécuriser les données avec transparence, traçabilité et confiance. Le SMA en cloud qui permet de centraliser l'information publique, et d'intégrer le comportement des acteurs pour prendre la décision du partage de ressources ; il contient le portail d'entrée qui permet la connexion et l'accès aux services de partage aux acteurs. Ces trois modules peuvent communiquer via l'API REST pour échanger des données dans la plateforme numérique avec simplicité et flexibilité.

La principale différence entre le travail que nous proposons et un réseau d'objets connectés classique réside dans le fait que dans notre solution, nous n'avons pas besoin d'un serveur central qui est remplacé par la blockchain distribuée. Enfin, la blockchain, en tant que base de données immuable, conserve une trace de chaque transaction avec ses caractéristiques (temps, durée, espaces et ressources utilisés), permettant ainsi un suivi et une allocation dynamique ainsi qu'une facturation plus précise et individualisée.

L'IoT permet de gérer les différentes tâches (correspondant au partage des ressources et des services) via les objets physiques connectés. Ainsi, le système physique d'IoT facilite l'accès aux objets connectés mais aussi la collecte des données et la gestion de leurs accès. Les différents acteurs (entreprises agissant sur certaines ressources et/ou entreprises gérant les ressources) sont connectés à cette interface du système physique d'IoT à partir de la plateforme blockchain et du SMA.

La traçabilité peut alors se faire à l'aide du réseau blockchain. Tout élément peut utiliser l'internet pour obtenir des informations du réseau blockchain, mais aucune organisation tierce ne peut modifier ou annuler les informations existantes enregistrées dans la blockchain.

Dans le cinquième chapitre, nous avons proposé une application d'appariement au sein de la plateforme qui consiste en l'allocation des ressources entre les offres et les besoins. Les agents dans le SMA en cloud proposés nous aident à contrôler l'IoT et à proposer une allocation

optimale des ressources. Le problème d'appariement consiste en l'allocation des ressources offertes par une entreprise à plusieurs entreprises sur la base de critères qui peuvent être très divers en fonction des objectifs visés. Ce problème d'appariement considère notamment la minimisation des coûts, l'adéquation entre la demande et l'offre pour chaque acteur et la maximisation du niveau de service. Une application numérique est proposée pour mettre en évidence le problème d'appariement considéré.

Actuellement, l'économie de partage est encore à un stade embryonnaire, et nous pensons que l'émergence des blockchains et d'autres méthodes décentralisées rendra le partage plus efficace, fiable, sécurisé et peu coûteux. L'économie de partage est en effet en train de décoller, mais avec plus de confiance et d'efficacité. Cependant, les coûts énergétiques et les différentes technologies rendent le partage de ressources industrielles connectées encore difficile.

6.2. Perspectives à nos travaux

Nous pouvons envisager plusieurs perspectives à nos travaux.

Tout d'abord, le problème d'appariement devrait être étendu pour prendre en compte différents critères et d'éventuelles modifications en ligne. Notre plateforme devrait prendre en compte la possibilité que les clients trichent ou la concurrence accrue aux extrémités du réseau (concurrence sur le marché, le prix et les profits etc.). Nous pouvons aussi proposer et tester un algorithme d'IA dans le processus suivi par Learning Agent du SMA pour aider à améliorer la prise de décision. La négociation entre les acteurs doit également être définie, comme le processus suivi par Learning Agent.

En parallèle, une architecture en Microservices (également appelé micro-application ou encore Small App) est une façon de concevoir les applications. Le principe est de créer un ensemble de petites applications (ou services) autonomes qui communiquent entre elles par un protocole simple (ex par API Rest). Elles sont conçues pour répondre à une fonction métier spécifique (le coût d'un hébergement d'un ou de plusieurs fournisseurs de « Blockchain Cloud System ») et doivent pouvoir être déployées facilement et indépendamment. L'intégration du système multi-agents existant vers une architecture orientée Multi-agents Microservices (MAMS) est donc une perspective intéressante. De plus, la blockchain du consortium devrait également être détaillée avec la demande de soutien monétaire comme application.

Enfin, le problème d'ordonnement doit être défini sur la base des appariements optimaux obtenus. Cet ordonnancement doit être dynamique et pourra donc influencer également sur les choix d'appariement.

Bibliographie

(Abdulkadiroglu & Sonmez, 2003) Abdulkadiroglu, A., and T. Sonmez (2003): School Choice: A Mechanism Design Approach," *American Economic Review*, 93, 729-747.

(Abadie, 2021) Amélie Abadie. Économie organisationnelle des plateformes marchandes orientées consommateur : modèle théorique et expérimentation. *Sociologie*. Université Panthéon-Sorbonne-Paris I, 2021. Français. (NNT : 2021PA01E032). (tel-03539622)

(Adolphs & Epple, 2015) Adolphs P. and U. Epple, 2015. Reference Architecture Model Industrie 4.0 (Rami 4.0). Status Report published online in July 2015, Düsseldorf Germany.

(Ageron *et al.*, 2020) Ageron, B., Bentahar O. and Gunasekaran, A. (2020) Digital supply chain: challenges and future directions, *Supply Chain Forum: An International Journal*, 21:3, p. 133-138.

(Alejandro *et al.*, 2019) Alejandro Germán Frank, Lucas Santos Dalenogare, Néstor Fabián Ayala, Industry 4.0 technologies: Implementation patterns in manufacturing companies, *International Journal of Production Economics*, Volume 210, 2019, Pages 15-26, ISSN 0925-5273, <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.01.004>.

(Ali *et al.*, 2018) Ali, M. S., Vecchio, M., Pincheira, M., Dolui, K., Antonelli F. and M. H. Rehmani, (2018). Applications of Blockchains in the Internet of Things: A Comprehensive Survey, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 21:2, p. 1676-1717.

(Alli & Alam, 2020) Alli A.A. and M.M. Alam, "The fog cloud of things: A survey on concepts, architecture, standards, tools, and applications." *Internet of Things*, Vol.9 (March), 2020, pp. 1–20.

(Aminzadegan *et al.*, 2019) Sajede Aminzadegan, Mohammad Tamannaie, Morteza Rasti-Barzoki, Multi-agent supply chain scheduling problem by considering resource allocation and transportation, *Computers & Industrial Engineering*, Volume 137, 2019, 106003, ISSN 0360-8352.

(Androulaki *et al.*, 2018) Androulaki, Elli & Barger, Artem & Bortnikov, Vita & Cachin, Christian & Christidis, Konstantinos & Caro, Angelo & Enyeart, David & Ferris, Christopher & Laventman, Gennady & Manevich, Yacov & Muralidharan, Srinivasan & Murthy, Chet & Nguyen, Binh & Sethi, Manish & Singh, Gari & Smith, Keith & Sorniotti, Alessandro & Stathakopoulou, Chrysoula & Vukolic, Marko & Yellick, Jason. (2018). *Hyperledger Fabric: A Distributed Operating System for Permissioned Blockchains*.

(Andresen, 2002) S. L. Andresen, "John McCarthy: father of AI," in *IEEE Intelligent Systems*, vol. 17, no. 5, pp. 84-85, Sept.-Oct. 2002, doi: 10.1109/MIS.2002.1039837.

(Armbrust *et al.*, 2010) Michael Armbrust, Armando Fox, Rean Griffith, Anthony D. Joseph, Randy Katz, Andy Konwinski, Gunho Lee, David Patterson, Ariel Rabkin, Ion Stoica, and Matei Zaharia. 2010. A view of cloud computing. *Commun. ACM* 53, 4 (April 2010), 50–58.

(Atzori *et al.*, 2010) Luigi Atzori, Antonio Iera, Giacomo Morabito, The Internet of Things: A survey, *Computer Networks*, Volume 54, Issue 15, 2010, Pages 2787-2805, ISSN 1389-1286.

(Attaran, 2020) Attaran M., 2020 Digital technology enablers and their implications for supply chain management, *Supply Chain Forum: An International Journal*, 21:3, p. 158-172. Fig. 5. UML Class Diagram.

(Axelrod, 1984) Axelrod Robert (1984). *The Evolution of Cooperation*. ISBN 0-465-02121-2

(Bai *et al.*, 2020) Bai, C. and Sarkis, J., (2020). A supply chain transparency and sustainability technology appraisal model for blockchain technology. *International Journal of Production Research*, 58 (7), 2142–2162.

(Basili & Rossi, 2020) Marcello Basili, Maria Alessandra Rossi, Platform-mediated reputation systems in the sharing economy and incentives to provide service quality: The case of ridesharing services, *Electronic Commerce Research and Applications*, Volume 39, 2020, 100835, ISSN 1567-4223, <https://doi.org/10.1016/j.elerap.2019.100835>.

(Bauer *et al.*, 2013) Bauer Martin, Boussard Mathieu, Bui Nicola, Carrez Francois, Jardak Christine, De Loof Jourik, Magerkurth Carsten, Meissner, Stefan, Nettsträter Andreas, Olivereau Alexis & Thoma Matthias, Joachim, Walewski, Stefa, Julinda, Salinas, Alexander. (2013). *Internet of Things – Architecture IoT-A Deliverable D1.5 – Final architectural reference model for the IoT v3.0*.

(Belk, 1988) Russell W. Belk, Possessions and the Extended Self, *Journal of Consumer Research*, Volume 15, Issue 2, September 1988, Pages 139–168, <https://doi.org/10.1086/209154>

(Belk, 2007) Belk, Russell, 2007. Why Not Share Rather Than Own? *The ANNALS of the American Academy of Political and Social Science*, 611(1), 126–140. <https://doi.org/10.1177/0002716206298483>

(Belk, 2010) Belk, Russell, 2010. *Sharing*. *J. Consum. Res.* 36 (5), 715–734.

(Bian *et al.*, 2021) Yiwen Bian, Yitong Cui, Shuai Yan, Xiaohua Han, Optimal strategy of a customer-to-customer sharing platform: Whether to launch its own sharing service?, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Volume 149, 2021, 102288, ISSN 1366-5545, <https://doi.org/10.1016/j.tre.2021.102288>.

(Biswal *et al.*, 2018) A. K. Biswal, M. Jenamani, S. K. Kumar, Warehouse efficiency improvement using RFID in a humanitarian supply chain: Implications for Indian food security system, *Transportation Research Part E* 109 (2018) 205–224.

(Trentesaux *et al.*, 2019) Theodor Borangiu, Damien Trentesaux, André Thomas, Paulo Leitão, Jose Barata, Digital transformation of manufacturing through cloud services and resource virtualization, *Computers in Industry*, Volume 108, 2019, Pages 150-162, ISSN 0166-3615, <https://doi.org/10.1016/j.compind.2019.01.006>.

(Botsman & Rogers, 2011) Botsman R, Rogers R. *What's mine is yours: How collaborative consumption is changing the way we live*. London: Collins; 2011.

(Caron *et al.*, 2016) Caron, X., Bosua, R., Maynard, S. B. and A. Ahmad, (2016). The Internet of Things (IoT) and its impact on individual privacy: An Australian perspective, *Computer law & security review*, 32, p. 4–15.

(Cao *et al.*, 2021) Cao, X., Bo, H., Liu, Y., & Liu, X. (2021). Effects of different resource-sharing strategies in cloud manufacturing: a Stackelberg game-based approach. *International Journal of Production Research*.

(Chen *et al.*, 2016) Tianqi Chen and Carlos Guestrin. 2016. XGBoost: A Scalable Tree Boosting System. In *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD '16)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 785–794.

(Cheng, 2016) Mingming Cheng, Sharing economy: A review and agenda for future research, *International Journal of Hospitality Management*, Volume 57, 2016, Pages 60-70, ISSN 0278-4319.

(Cheng *et al.*, 2018) Cheng, Y., Tao, F., Xu L. and D. Zhao, (2018). Advanced manufacturing systems: supply–demand matching of manufacturing resource based on complex networks and Internet of Things, *Enterprise Information Systems*, 12:7, 780-797

(Chertow, 2007) Chertow, M.R. (2007). “Uncovering” Industrial Symbiosis. *Journal of Industrial Ecology*, 11(1), 11–30.

(Chi, 2021) Huihui Chi. Perspectives de l'économie du partage : limite de propriété temporelle, fournisseur auto-cannibalisant, nouveaux modèles commerciaux et politique de données. *Sociologie*. Université Panthéon-Sorbonne - Paris I, 2021. Français. (NNT : 2021PA01E029). (tel-03608152)

(CISCO, 2020) Cisco Annual Internet Report (2018–2023). [Online]. Available: <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/executive-perspectives/annual-internet-report/index.html>

(Cortade & Poudou, 2022) Thomas Cortade, Jean-Christophe Poudou, Peer-to-peer energy platforms: Incentives for prosuming, *Energy Economics*, Volume 109, 2022, 105924, ISSN 0140-9883, <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2022.105924>.

(Cugueró-Escofet *et al.*, 2019) Cugueró-Escofet, N.; Ficapal-Cusí, P.; Torrent-Sellens, J. Sustainable Human Resource Management: How to Create a Knowledge Sharing Behavior through Organizational Justice, Organizational Support, Satisfaction and Commitment. *Sustainability* 2019, 11, 5419. <https://doi.org/10.3390/su11195419>

(Curtis & Mont, 2020) Steven Kane Curtis, Oksana Mont, Sharing economy business models for sustainability, *Journal of Cleaner Production*, 2020.

(Daxhammer *et al.*, 2019) Daxhammer, K., Luckert, M., Doerr, M. and T. Bauernhansl, “Development of a Strategic Business Model Framework for Multi-Sided Platforms to Ensure Sustainable Innovation in Small and Medium-Sized Enterprises”, *Procedia Manufacturing of the 25th International Conference on Production Research Manufacturing Innovation: Cyber Physical Manufacturing*, August 9-14, 2019 Chicago, USA, 39, pp. 1354–1362.

(Davlembayeva *et al.*, 2020) Dinara Davlembayeva, Savvas Papagiannidis, Eleftherios Alamanos, Sharing economy: Studying the social and psychological factors and the outcomes of social exchange, *Technological Forecasting and Social Change*, Volume 158, 2020, 120143, ISSN 0040-1625, <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2020.120143>

- (Delaram *et al.*, 2021) Delaram J., Houshamand M, Ashtiani F. and O. Fatahi Valilai (2021). A utility-based matching mechanism for stable and optimal resource allocation in cloud manufacturing platforms using deferred acceptance algorithm, *Journal of Manufacturing Systems*, 60, 569–584.
- (Demir *et al.*, 2019) Kadir Alpaslan Demir, Gözde Döven, Bülent Sezen, *Industry 5.0 and Human-Robot Co-working*, *Procedia Computer Science*, Volume 158, 2019, Pages 688-695, ISSN 1877-0509, <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.09.104>.
- (D’Hauwers *et al.*, 2020) R. D’Hauwers, J. van der Bank, M. Montakhabi, Trust, transparency and security in the sharing economy: What is the role of the government?, *TIM Review*. 10 (2020) 6– 18. <https://doi.org/10.22215/timreview/1352>
- (Einav *et al.*, 2016) Liran Einav, Chiara Farronato, Jonathan Levin, 2016, *Peer-to-Peer Markets*, *Annual Review of Economics*, 2016 8:1, 615-635, [10.1146/annurev-economics-080315-015334](https://doi.org/10.1146/annurev-economics-080315-015334)
- (Ehrgott, 2005) Matthias Ehrgott, *Multicriteria Optimization*, vol. 1, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2005.
- (Eloranta & Turunen, 2015) Ville Eloranta, Taija Turunen, *Platforms in service-driven manufacturing: Leveraging complexity by connecting, sharing, and integrating*, *Industrial Marketing Management*, Volume 55, 2016, Pages 178-186, ISSN 0019-8501, <https://doi.org/10.1016/j.indmarman.2015.10.003>.
- (Faris *et al.*, 2022) Faris Ahmad Fadzil, Viknesh Andiappan, Denny K.S. Ng, Lik Yin Ng, Anuar Hamid, *Sharing carbon permits in industrial symbiosis: A game theory-based optimisation model*, *Journal of Cleaner Production*, Volume 357, 2022, 131820, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131820>.
- (Ferber, 1995) Ferber J., *Les Systèmes multi-agents : Vers une intelligence collective*, InterEditions, 1995, 522 p
- (Ferber, 1999) Ferber J. *Multi-agent systems: An introduction to distributed artificial intelligence*. Addison-Wesley Publisher; 1999.
- (Fisher *et al.*, 2018) Oliver Fisher, Nicholas Watson, Laura Porcu, Darren Bacon, Martin Rigley, Rachel L. Gomes, *Cloud manufacturing as a sustainable process manufacturing route*, *Journal of Manufacturing Systems*, Volume 47, 2018, pp. 53-68.
- (Frederico *et al.*, 2019) Frederico, G.F., Garza-Reyes, J.A., Anosike, A.I., Kumar, V. (2019). *Supply Chain 4.0: concepts, maturity and research agenda*. *Supply Chain Management: An International Journal*, p. 1-21.
- (Frenken & Schor, 2017) Koen Frenken, Juliet Schor, *Putting the sharing economy into perspective*, *Environmental Innovation and Societal Transitions*, Volume 23, 2017, Pages 3-10, ISSN 2210-4224, <https://doi.org/10.1016/j.eist.2017.01.003>.
- (Gale & Shapley, 1962) Gale D, Shapley LSJ. *College admissions and the stability of marriage*. *Am Math Mon* 1962;69(1):9–15. <https://doi.org/10.4169/amer.math.monthly.120.05.386>
- (Ganapati & Reddick, 2018) Sukumar Ganapati, Christopher G. Reddick, *Prospects and challenges of sharing economy for the public sector*, *Government Information Quarterly*,

Volume 35, Issue 1, 2018, Pages 77-87, ISSN 0740-624X, <https://doi.org/10.1016/j.giq.2018.01.001>.

(Geoffrion, 1968) Arthur M Geoffrion, Proper efficiency and the theory of vector maximization, *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, Volume 22, Issue 3, 1968, Pages 618-630, ISSN 0022-247X, [https://doi.org/10.1016/0022-247X\(68\)90201-1](https://doi.org/10.1016/0022-247X(68)90201-1).

(Ghadimi *et al.*, 2018) Pezhman Ghadimi, Farshad Ghassemi Toosi, Cathal Heavey, A multi-agent systems approach for sustainable supplier selection and order allocation in a partnership supply chain, *European Journal of Operational Research*, Volume 269, Issue 1, 2018, Pages 286-301, ISSN 0377-2217, <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.07.014>.

(Giannoccaro, 2018) Ilaria Giannoccaro, Centralized vs. decentralized supply chains: The importance of decision maker's cognitive ability and resistance to change, *Industrial Marketing Management*, Volume 73, 2018, Pages 59-69, ISSN 0019-8501, <https://doi.org/10.1016/j.indmarman.2018.01.034>.

(Granjal *et al.*, 2015) J. Granjal, E. Monteiro, J.S. Silva, Security for the internet of things: A Survey of existing protocols and open research issues, *IEEE Commun. Surv. Tutor.* 17 (3) (2015) 1294–1312.

(Green, 2014) J. Green. (2014). "IoT Reference Model Whitepaper", Costco, Nov. 2014; <https://www.iotwf.com/resources/71>

(Gonzalez-Feliu & Morana, 2011) Gonzalez-Feliu, J. et Morana, J. (2011), Collaborative transportation sharing: from theory to practice via a case study from France. In Yearwood, J.L. and Stranieri, A., *Technologies for Supporting Reasoning Communities and Collaborative Decision Making: Cooperative Approaches*, Information Science Reference, Hershey, PA, pp. 252-271.

(Gonzalez-Ramirez & Rodriguez-Gonzalez, 2021) Gonzalez-Ramirez, M.G., Rodriguez-Gonzalez, P.T., 2021. Game theory in sustainable decision-making: a new acetic acid plant as a case study. *J. Clean. Prod.* 321, 128962.

(Goudin, 2016) Goudin Pierre. *The Cost of Non-Europe in the Sharing Economy: Economic, Social and Legal Challenges and Opportunities*; European Parliamentary Research Service: Brussels, Belgium, 2016.

(Hafezalkotob *et al.*, 2022) Ashkan Hafezalkotob, Keyvan Fardi, Uwe Aickelin, Samaneh Chaharbaghi, Hadi Akbarzadeh Khorshidi, A cooperative robust human resource allocation problem for healthcare systems for disaster management, *Computers & Industrial Engineering*, Volume 170, 2022, 108283, ISSN 0360-8352.

(Hamari *et al.*, 2016) Hamari, J., Sjöklint, M. and Ukkonen, A. (2016), The sharing economy: Why people participate in collaborative consumption. *J Assn Inf Sci Tec*, 67: 2047-2059. <https://doi.org/10.1002/asi.23552>

(Hatzopoulos & Roma, 2017) Vassilis Hatzopoulos, Sofia Roma, 'Caring for sharing? The collaborative economy under EU law', (2017), 54, *Common Market Law Review*, Issue 1, pp. 81-127

- (Hawlitschek *et al.*, 2016) Hawlitschek, F., Teubner, T., Adam, M.T., Borchers, N.S., Moehlmann, M., & Weinhardt, C. (2016). Trust in the Sharing Economy: An Experimental Framework. International Conference on Interaction Sciences.
- (Hennet & Mahjoub, 2010) Mahjoub S, Hennet JC. Toward the fair sharing of profit in a supply network formation. International Journal of Production Economics. 2010; 127:112-120.
- (Hennequin et al., 2019) Hennequin, S., Ho, V.T., Le Thi, H.A., Nouinou, H., Roy, D. (2020). Industrial Symbioses: Bi-objective Model and Solution Method. Optimization of Complex Systems: Theory, Models, Algorithms and Applications. WCGO 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol 991. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-21803-4_104
- (Hertz & Alfredsson, 2003) Susanne Hertz, Monica Alfredsson, Strategic development of third party logistics providers, Industrial Marketing Management, Volume 32, Issue 2, 2003, Pages 139-149, ISSN 0019-8501, [https://doi.org/10.1016/S0019-8501\(02\)00228-6](https://doi.org/10.1016/S0019-8501(02)00228-6).
- (Ajzen, 1991) Icek Ajzen, The theory of planned behavior, Organizational Behavior and Human Decision Processes, Volume 50, Issue 2, 1991, Pages 179-211, ISSN 0749-5978, [https://doi.org/10.1016/0749-5978\(91\)90020-T](https://doi.org/10.1016/0749-5978(91)90020-T).
- (Irving, 1985) Robert W Irving, An efficient algorithm for the “stable roommates” problem, Journal of Algorithms, Volume 6, Issue 4, 1985, Pages 577-595, ISSN 0196-6774 [https://doi.org/10.1016/0196-6774\(85\)90033-1](https://doi.org/10.1016/0196-6774(85)90033-1).
- (Janiesch et al., 2021) Janiesch, C., Zschech, P. & Heinrich, K. Machine learning and deep learning. *Electron Markets* **31**, 685–695 (2021). <https://doi.org/10.1007/s12525-021-00475-2>
- (John, 2013) John NA. Sharing, collaborative consumption and Web 2.0, Media@LSE, Working Paper No 26, LSE, London; 2013.
- (Khan *et al.*, 2019) Khan, W.Z., Rehman, M.H., Zangoti, H.M., Afzal, M.K., Armi N. and K. Salah, 2019. “Industrial internet of things: Recent advances, enabling technologies and open challenges.” *Computers and Electrical Engineering*, Vol.81 (Dec.), 1-13 published online.
- (Khan & Salah, 2018) M. A. Khan, K. Salah, IoT security: review, blockchain solutions, and open challenges, *Future Generation Computer Systems* **82** (2018) 395–411.
- (Klarin & Suseno, 2021) Anton Klarin, Yuliani Suseno, A state-of-the-art review of the sharing economy: Scientometric mapping of the scholarship, *Journal of Business Research*, Volume 126, 2021, Pages 250-262, ISSN 0148-2963, <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2020.12.063>.
- (Koopman *et al.*, 2015) Christopher Koopman, Matthew Mitchell, and Adam Thierer, The Sharing Economy and Consumer Protection Regulation: The Case for Policy Change, *J. Bus. Entrepreneurship & L.* **529** (2015) <https://digitalcommons.pepperdine.edu/jbel/vol8/iss2/4>
- (Koh et al., 2020) Koh, K., Dolgui A. and Sarkis J. (2020) Blockchain in transport and logistics – paradigms and transitions, *International Journal of Production Research*, **58**:7, p. 2054–2062.
- (Kretschmer et al., 2022) Kretschmer, T, Leiponen, A, Schilling, M, Vasudeva, G. Platform ecosystems as meta-organizations: Implications for platform strategies. *Strat Mgmt J.* **2022**; **43**: 405– 424. <https://doi.org/10.1002/smj.3250>
- (Kuhn, 1955) Kuhn, H. W. The Hungarian method for the assignment problem. *Nav. Res. Logist. Q.* **1955**, **2**, 83– 97, DOI : 10.1002/nav.3800020109

- (Lamberton, 2016) Lamberton C. Collaborative consumption: A goal-based framework. *Current Opinion in Psychology*. 2016; 10:55-59.
- (Lee & Kim, 2008) J.-H. Lee & C.-O. Kim (2008) Multi-agent systems applications in manufacturing systems and supply chain management: a review paper, *International Journal of Production Research*, 46:1, 233-265, DOI: 10.1080/00207540701441921
- (Lee *et al.*, 2018) Lee, Z.W.Y., Chan, T.K.H., Balaji, M.S. and Chong, A.Y.-L. (2018), "Why people participate in the sharing economy: an empirical investigation of Uber", *Internet Research*, Vol. 28 No. 3, pp. 829-850. <https://doi.org/10.1108/IntR-01-2017-0037>
- (Lessig, 2008) Lessig, Lawrence. 2008. *Remix: Making Art and Commerce Thrive in the Hybrid Economy*. New York, NY: Penguin Press.
- (Li *et al.*, 2021) Li, M., Li, Z., Huang, X., & Qu, T. (2021). Blockchain-based digital twin sharing platform for reconfigurable socialized manufacturing resource integration. *International Journal of Production Economics*, 240. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2021.108223>
- (Li *et al.*, 2019) Li, M., Shen, L., & Huang, G. Q. (2019). Blockchain-enabled workflow operating system for logistics resources sharing in E-commerce logistics real estate service. *Computers and Industrial Engineering*, 135, 950–969. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.07.003>
- (Li & Zhang *et al.*, 2019) Li, X., Zhang, J., Bian, J., Tong, Y., & Liu, T.-Y. (2019). A Cooperative Multi-Agent Reinforcement Learning Framework for Resource Balancing in Complex Logistics Network. <http://arxiv.org/abs/1903.00714>
- (Lin *et al.*, 2017) Lin S-W, Miller B., Durand J., Bleakley G., Chigani A., Martin R., et al. Reference Architecture. *Ind Internet Consort*. 2017;1.80:1–7.
- (Liu *et al.*, 2018) S. Liu, D. Roy, and S. Hennequin (2018). Blockchains and Smart Contracts for the Management, Control and Security of Industrial IoTs, *Proceedings of Industrial Internet of Things and Smart Manufacturing conference, (IoTSM 2018)*, September 2018, London, UK.
- (Liu *et al.*, 2019) S. Liu, D. Roy and S. Hennequin, "Blockchains and Internet of Things for the Pooling of Warehouse Resources", *South Asian Journal of Social Studies and Economics*, Vol5:4 (2019), p. 1-16.
- (Liu *et al.*, 2019b) S. Liu, D. Roy, and S. Hennequin (2019). Mutualisation décentralisée des activités d'entreposage à l'aide de blockchains, (Prolog 2019) à Metz, France.
- (Liu *et al.*, 2020) S. Liu, D. Roy, and S. Hennequin (2020). HYBRID ARCHITECTURE FOR THE CONTROL OF INDUSTRIAL IOTS, *Modelling and Simulation 2020 – 34th European Simulation and Modelling Conference, (ESM 2020)* in Toulouse, France.
- (Liu *et al.*, 2021) S. Liu, S. Hennequin and D. Roy, "Enterprise Platform of Logistics Services Based on a Multi-Agents Mechanism and Blockchains", Accepted in 2021 17th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing (IFAC INCOM 2021).
- (Liu *et al.*, 2021b) S. Liu, S. Hennequin and D. Roy (2021), Cloud architecture based multi agent system for a resources sharing application platform, 2021 IEEE 17th International Conference on Automation Science and Engineering (IEEE CASE 2021), August 23-27, 2021, Lyon, France.
- (Liu *et al.*, 2022) S. Liu, M. A. Yazdani, S. Hennequin and D. Roy (2022), Cloud Architecture based Multi agent Platform for Matching in Resource Sharing, 10th IFAC Conference on

Manufacturing Modelling, Management and Control (IFAC MIM 2022), June 22-24, 2022, Nantes, France.

(Maddikunta *et al.*, 2022) Praveen Kumar Reddy Maddikunta, Quoc-Viet Pham, Prabadevi B, N Deepa, Kapal Dev, Thippa Reddy Gadekallu, Rukhsana Ruby, Madhusanka Liyanage, Industry 5.0: A survey on enabling technologies and potential applications, *Journal of Industrial Information Integration*, Volume 26, 2022, 100257, ISSN 2452-414X

(Mahesh, 2020) Mahesh Batta., “Machine Learning Algorithms - A Review,” *Int. J. Sci., Res.(IJSR)*, Vol. 9, No. 1, pp. 381–386, Jan. 2020, doi:10.21275/ART20203995

(Ma *et al.*, 2017) Ma, Z., Long, L., Zhang, Y. et al. Why do high-performance human resource practices matter for team creativity? The mediating role of collective efficacy and knowledge sharing. *Asia Pac J Manag* 34, 565–586 (2017). <https://doi.org/10.1007/s10490-017-9508-1>

(Maher *et al.*, 2021) Maher A. N. Agi, Sohrab Faramarzi-Oghani & Öncü Hazır (2021) Game theorybased models in green supply chain management: a review of the literature, *International Journal of Production Research*, 59:15, 4736-4755, DOI: 10.1080/00207543.2020.1770893

(Makaci *et al.*, 2015) Makaci M, Reaidy P, Samuel K, Botta-Genoulaz V, Monteiro T. A typology for warehouse pooling: An exploratory study, proceedings of the 10th European Research Seminar on Logistics and SCM (ERS 2015). Copenhagen, Denmark; 2015.

(Moghadam & Zarandi, 2021) Moghadam, F. S., and M. H. Zarandi, (2021). Mitigating bullwhip effect in an agent-based supply chain through a fuzzy reverse ultimatum game negotiation module, *Applied Soft Computing* (2021), <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2021.108278>

(Muhuri *et al.*, 2019) Muhuri, P.K., Shukla, A.K. and A. Abraham,. 2019. “Industry 4.0: A bibliometric analysis and detailed overview.” *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Vol.78 (Feb), 218-235.

(Munkres, 1957) Munkres J. Algorithms for the assignment and transportation problems. *J Soc Ind Appl Math* 1957 ;5(1) :32–8. <https://doi.org/10.1137/0105003>.

(Murray, 2016) D. Murray, (2016). Distributed resource sharing using blockchain technology Ethereum, Master degree in Computer Science, California State University, Sacramento, USA.

(O’Mahony & Karp, 2022) O’Mahony, S., & Karp, R. (2022). From proprietary to collective governance: How do platform participation strategies evolve? *Strategic Management Journal*, 43(3), 530–562.

(Parsons *et al.*, 2002) Parsons, S., Wooldridge, M. Game Theory and Decision Theory in Multi-Agent Systems. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems* 5, 243–254 (2002). <https://doi.org/10.1023/A:1015575522401>

(Pietarinen, 2004) Pietarinen AV. Multi-agent systems and game theory-A Peirce an manifesto, *International Journal of General Systems*. 2004;33(4):395-414.

(Porter & Heppelmann, 2015) Porter ME, Heppelmann JE (2015) How smart, connected products are transforming companies. *Harvard business review* 93(10):96-114

(Poon & Dryja, 2016) J. Poon and T. Dryja, “The bitcoin lightning network: scalable off-chain instant payments,” 2016, available at: <https://lightning.network/lightning-network-paper.pdf>

(Rajput & Singh, 2019) Shubhangini Rajput, Surya Prakash Singh, Connecting circular economy and industry 4.0, *International Journal of Information Management*, Volume 49, 2019, Pages 98-113, ISSN 0268-4012, <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2019.03.002>.

(Rakotonarivo *et al.*, 2009) Dina Rakotonarivo, Jesus Gonzalez-Feliu, Abdelkader Aoufi, Joëlle Morana. *La mutualisation*. 2009.

(Ren *et al.*, 2021) Ren, Y., Leng Y., Qi J., Sharma P.K., Wang, J., Almakhadmeh Z. and A. Tolba (2021). Multiple cloud storage mechanism based on blockchain in smart homes. *Future Generation Computer Systems*, 115, p. 304–313.

(Richter & Slowinski, 2019) Richter, H., Slowinski, P.R. The Data Sharing Economy: On the Emergence of New Intermediaries. *IIC* 50, 4–29 (2019). <https://doi.org/10.1007/s40319-018-00777-7>

(Rong & Sun *et al.*, 2021) Rong, K., Sun, H., Li, D., & Zhou, D. (2021). Matching as Service Provision of Sharing Economy Platforms: An Information Processing Perspective. *Technological Forecasting and Social Change*, 171. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.120901>

(Rong & Li *et al.*, 2021) Rong Ke, Li Boyi, Peng Wan, Zhou Di, Shi Xinwei, Sharing economy platforms: creating shared value at a business ecosystem level, *Technological Forecasting and Social Change*, Volume 169, 2021, 120804, ISSN 0040-1625, <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.120804>.

(Roos & Hahn, 2019) Roos, D., Hahn, R. Understanding Collaborative Consumption: An Extension of the Theory of Planned Behavior with Value-Based Personal Norms. *J Bus Ethics* 158, 679–697 (2019). <https://doi.org/10.1007/s10551-017-3675-3>

(Rouquet & Vauché, 2015) Rouquet, A. and L. Vauché, (2015). A Typology of Logistics Pooling in Supply Chains, *Supply Chain Forum: An International Journal*, 16:2, p. 2-12.

(Roy *et al.*, 2004) Roy, D., Anciaux, D., Monteiro, T. et Ouzizi, L., 2004, Multi-agent architecture for supply chain management, *Journal of Manufacturing Technology Management (ex IMS) – Special Issue on Logistics and Supply Chain Management with Artificial Intelligent Techniques*, 15(8), p. 745-755, (dec. 2004).

(Roy *et al.*, 2014) D. Roy, T. Cortade, S. Hennequin, « Modèle base sur la théorie des jeux pour l'étude de la mise en commun d'une ressource de production », *Proceedings de MOSIM'14*, du 5 au 7 novembre 2014, Nancy, France.

(Seethamraju, 2015) Seethamraju, R. Adoption of Software as a Service (SaaS) Enterprise Resource Planning (ERP) Systems in Small and Medium Sized Enterprises (SMEs). *Inf Syst Front* 17, 475–492 (2015). <https://doi.org/10.1007/s10796-014-9506-5>

(Shapley & Scarf, 1974) Shapley L, Scarf H. On cores and indivisibility. *J Math Econ* 1974;1(1):23–37. [https://doi.org/10.1016/0304-4068\(74\)90033-0](https://doi.org/10.1016/0304-4068(74)90033-0).

(Suchman, 1995) Suchman M.C., Managing legitimacy: Strategic and institutional approaches, *Acad. Manage. Rev.* 20 (3) (1995) 571–610.

(Sutherland *et al.*, 2018) Will Sutherland, Mohammad Hossein Jarrahi, The sharing economy and digital platforms: A review and research agenda, *International Journal of Information*

Management, Volume 43, 2018, Pages 328-341, ISSN 0268-4012, <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2018.07.004>.

(Szaller *et al.*, 2020) Szaller, Á., Egri, P., & Kádár, B. (2020). Trust-based resource sharing mechanism in distributed manufacturing. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 33(1), 1–21. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2019.1699257>

(Szaller *et al.*, 2023) Ádám Szaller, Christian Fries, Botond Kádár, Financial aspects of a trust-based resource sharing platform, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, Volume 43, 2023, Pages 88-105, ISSN 1755-5817, <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2023.03.004>

(Tafreshian *et al.*, 2020) Amirmahdi Tafreshian, Neda Masoud, Yafeng Yin (2020) *Frontiers in Service Science: Ride Matching for Peer-to-Peer Ride Sharing: A Review and Future Directions*. *Service Science* 12(2-3):44-60. <https://doi.org/10.1287/serv.2020.0258>

(Tao *et al.*, 2018) Fei Tao, Qinglin Qi, Ang Liu, Andrew Kusiak, Data-driven smart manufacturing, *Journal of Manufacturing Systems*, Volume 48, Part C, 2018, Pages 157-169, ISSN 0278-6125, <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2018.01.006>.

(Trentesaux *et al.*, 2017) Adriana Giret, Damien Trentesaux, Miguel A. Salido, Emilia Garcia, Emmanuel Adam, A holonic multi-agent methodology to design sustainable intelligent manufacturing control systems, *Journal of Cleaner Production*, Volume 167, 2017, Pages 1370-1386, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.079>.

(Trentesaux *et al.*, 2019) ElMamy, Sidi Boubacar, Hichem Mrabet, Hassen Gharbi, Abderrazak Jemai, and Damien Trentesaux. 2020. "A Survey on the Usage of Blockchain Technology for Cyber-Threats in the Context of Industry 4.0" *Sustainability* 12, no. 21: 9179. <https://doi.org/10.3390/su12219179>

(Truong *et al.*, 2021) Yann Truong, Claire-Lise Ackermann, Richard R. Klink, The role of legitimacy and reputation judgments in users' selection of service providers on sharing economy platforms, *Information & Management*, Volume 58, Issue 8, 2021, 103529, ISSN 0378-7206, <https://doi.org/10.1016/j.im.2021.103529>.

(Tseng *et al.*, 2020) Tseng, L. Wong, L., Otoum, S., Aloqaily M. and J. B. Othman (2020). Blockchain for Managing Heterogeneous Internet of Things: A Perspective Architecture, *IEEE Network*, 34:1, p. 16-23.

(Tussyadiah, 2016) Iis P. Tussyadiah, Factors of satisfaction and intention to use peer-to-peer accommodation, *International Journal of Hospitality Management*, Volume 55, 2016, Pages 70-80, ISSN 0278-4319, <https://doi.org/10.1016/j.ijhm.2016.03.005>.

(Vasiliauskas & Jakubauskas, 2007) Aidias Vasilis Vasiliauskas & Gražvydas Jakubauskas (2007) Principle and benefits of third party logistics approach when managing logistics supply chain, *Transport*, 22:2, 68-72, DOI: 10.1080/16484142.2007.9638101

(Villa & Bruno, 2013) Villa A. and Bruno G. (2013), Promoting SME cooperative aggregations : main criteria and contractual models, *International Journal of Operation Research*, 51(23–24), p. 7439–7447.

(Wang *et al.*, 2019) Yonggui Wang, Diandian Xiang, ZhiYong Yang, Shuang (Sara) Ma, Unraveling customer sustainable consumption behaviors in sharing economy: A socio-

economic approach based on social exchange theory, *Journal of Cleaner Production*, Volume 208, 2019, Pages 869-879, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.139>.

(Wirtz et al., 2019) Wirtz, J., So, K.K.F., Mody, M.A., Liu, S.Q. and Chun, H.H. (2019), "Platforms in the peer-to-peer sharing economy", *Journal of Service Management*, Vol. 30 No. 4, pp. 452-483. <https://doi.org/10.1108/JOSM-11-2018-0369>

(Xu, 2012) Xun Xu, From cloud computing to cloud manufacturing, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Volume 28, Issue 1, 2012, Pages 75-86, ISSN 0736-5845, <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2011.07.002>.

(Xu et al., 2021) Xun Xu, Yuqian Lu, Birgit Vogel-Heuser, Lihui Wang, Industry 4.0 and Industry 5.0—Inception, conception and perception, *Journal of Manufacturing Systems*, Volume 61, 2021, Pages 530-535, ISSN 0278-6125, <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.10.006>.

(Yan et al., 2021) Pengyu Yan, Xiaoqiang Cai, Debing Ni, Feng Chu, Heng He, Two-stage matching-and-scheduling algorithm for real-time private parking-sharing programs, *Computers & Operations Research*, Volume 125, 2021, 105083, ISSN 0305-0548, <https://doi.org/10.1016/j.cor.2020.105083>.

(Yang et al., 2021) Chen Yang, Shulin Lan, Tingyu Lin, Lihui Wang, Zilong Zhuang, George Q. Huang, Transforming Hong Kong's warehousing industry with a novel business model: A game-theory analysis, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Volume 68, 2021, 102073, ISSN 0736-5845, <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2020.102073>.

(Yazan et al., 2020) Yazan, DM, Yazdanpanah, V, Fraccascia, L. Learning strategic cooperative behavior in industrial symbiosis: A game-theoretic approach integrated with agent-based simulation. *Bus Strat Env.* 2020; 29: 2078– 2091. <https://doi-org.bases-doc.univ-lorraine.fr/10.1002/bse.2488>

(Yu et al., 2015) Yu Y, Benjaafar S, Gerchak Y. Capacity sharing and cost allocation among independent firms with congestion, production and operations management. 2015;24(8):1285-1310.

(Yu et al., 2020) Chunyang Yu, Xun Xu, Shiqiang Yu, Zhiqian Sang, Cheng Yang, Xuanlin Jiang, Shared manufacturing in the sharing economy: Concept, definition and service operations, *Computers & Industrial Engineering*, Volume 146, 2020, 106602, ISSN 0360-8352, <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106602>.

(Yu & Jiang et al., 2020) Yu, C., Jiang, X., Yu, S., & Yang, C. (2020). Blockchain-based shared manufacturing in support of cyber physical systems: concept, framework, and operation. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 64. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2019.101931>

(Yu & Shen, 2019) Tao Yu, Wei Shen, Funds sharing regulation in the context of the sharing economy: Understanding the logic of China's P2P lending regulation, *Computer Law & Security Review*, Volume 35, Issue 1, 2019, Pages 42-58, ISSN 0267-3649, <https://doi.org/10.1016/j.clsr.2018.10.001>

(Zdravković et al., 2018) Zdravković, M., Zdravković, J., Aubry, A., Moalla, N., Guedria W. and J. Sarraipa, 2018. "Domain framework for implementation of open IoT ecosystems." *International Journal of Production Research*, Vol.56(7), 2552-2569.

(Zhao *et al.*, 2021) Jianyu Zhao, Xi Xi, Shanshan Wang, Caiyan Gong, Dynamic analysis of different resource allocations: Implications for resource orchestration management of strategic alliances, *Computers & Industrial Engineering*, Volume 158, 2021, 107393, ISSN 0360-8352, <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107393>.

(Zhong *et al.*, 2022) Ray Y. Zhong, Kai Kang, Chenglin Yu, Yicha Zhang, Fei Tao, Alain Bernard, A resource sharing approach for PSS-enabled additive manufacturing platform, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, Volume 39, 2022, Pages 414-426, ISSN 1755-5817, <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2022.10.004>.

(Zhou *et al.*, 2018) Jianghui Zhou, Chunming Cheng, Li Kang, Ruizhi Sun, Integration and Analysis of Agricultural Market Information Based on Web Mining, *IFAC-PapersOnLine*, Volume 51, Issue 17, 2018, Pages 778-783, ISSN 2405-8963.

Annexe

❖ Algorithme de résolution d'appariement 1 - Gale-Shapley (GS) :

Le mécanisme GS (Considérer l'algorithme Demand-Proposing Deferred Acceptance (DPDA), sinon pour l'algorithme Offer-Proposing Deferred Acceptance) comme suit :

Algorithme 1. Gale-Shapley (GS) algorithm

Étape 0: Définition l'offre j est acceptable pour la demande i .

Étape 1: Chaque demande est proposée à l'ensemble des offres préférées. Et chaque offre rejette toutes les propositions sauf celle de la demande acceptable la plus préférée. Toute demande qui n'est pas rejetée est temporairement acceptée.

Étape $k \geq 2$: Chaque demande qui a été rejetée au tour précédent est proposée au choix suivant s'il reste une offre acceptable à laquelle elle n'a pas encore été proposé. Chaque offre rejette toutes les demandes acceptables, sauf la plus préférée parmi les nouvelles propositions et la demande temporairement acceptée du tour précédent.

L'algorithme DPDA s'arrête lorsqu'il n'y a plus de nouvelles propositions. Chaque acceptation temporaire devient définitive.

❖ Algorithme de résolution d'appariement 2 - Irving's (IR) :

Le mécanisme de IR algorithme est le suivant :

Chaque demande se souvient de son favori - la demande a donné la meilleure proposition.

Algorithme 2. Irving's (IR) algorithm

Étape 0: Chaque demandeur montre du doigt son préféré.

Étape 1: Chaque demande s'applique à la première préférée. Chaque offre j correspond à une demande jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de demande qui l'ait classée en première position.

Étape $k \geq 2$: Chaque demande non appariée s'applique au k -ième préféré. Chaque offre j correspond à une demande jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de demandes qui la classent k -ième.

❖ **Algorithme de résolution d'appariement 3 - Top trading cycles (TTC) :**

Le mécanisme de cet algorithme est le suivant :

Algorithme 3. TTC algorithme

Étape 0: Attribuer à chaque demandeur i initialement une offre j , que nous avons nommé offre propriétaire.

Étape 1: Chaque demandeur indique son premier choix (éventuellement le sien). Chaque offre j renvoie à son propriétaire (initialement alloué).

Étape 2: Cela crée un graphe dirigé. Dans ce graphe, identifie les cycles. Chaque demandeur est dans au plus un cycle; il s'arrête par cycle existant.

Étape 3: Donner à chaque demandeur d'un cycle l'offre qu'il pointe et retirez l'offre qui lui a été attribuée.

S'il reste une demande et une offre non concordantes, recommencer ce processus.

❖ **Algorithme de résolution d'appariement 4 - Kuhn-Munkres (KM) :**

Le mécanisme de KM algorithme est le suivant:

Algorithme 3. KM algorithme

Étape 0: Remplir la matrice, et les éléments de la matrice selon le degré de satisfaction du demandeur ou du fournisseur.

Étape 1: Soustraire la plus petite entrée de chaque ligne de toutes les autres entrées de la ligne de la matrice. Ainsi, la plus petite entrée de la rangée est désormais égale à 0.

Étape 2: Soustraire la plus petite entrée de chaque colonne de toutes les autres entrées de la colonne de la matrice. Ainsi, la plus petite entrée de la colonne est désormais égale à 0.

Étape 3: Couvrir chaque zéro dans les lignes et les colonnes de la matrice avec un minimum de lignes. Si le nombre de lignes couvrant les éléments zéro est égal au nombre de lignes de la matrice, une allocation optimale est obtenue parmi les zéros; l'algorithme s'arrête et passe à l'étape 5.

Étape 4: Trouver l'élément minimum non couvert par rapport à chaque élément couvert ; s'il est couvert deux fois, ajouter deux fois l'élément minimum.

Étape 5: Sélectionner une paire demande-offre correspondante du fournisseur en choisissant un ensemble de zéros. Supprimer les demandeurs et les offres alloués. S'il ne reste aucun demandeur, l'algorithme est terminé. Sinon, refaire cette étape.

Ces algorithmes sont testés sur des exemples d'application dans le chapitre 5.