

# Rapport du mini projet

Filière : **Ingénierie des Systèmes d'Information et de Communication (ISIC)**  
3<sup>ème</sup> année Cycle Ingénieur

**IoT & 4G 5G - Bibliometrics**

**Réalisé par :**

Fatima Zahra GRIMA  
Kawtar ABDERRAZAK  
Samira AIT ZAIM

**Encadré par :**

**Mr A.HAIDINE**

# Dédicaces

## À nos parents,

Pour votre amour inconditionnel, votre soutien constant et vos encouragements infatigables tout au long de mon parcours académique. Votre confiance en mes capacités a été ma plus grande motivation.

## À nos professeurs,

Pour vos conseils éclairés, votre patience et votre dévouement. Vous avez su me guider et m'inspirer à donner le meilleur de moi-même.

## À nos amis,

Pour votre amitié sincère, votre aide précieuse et vos moments de réconfort durant cette aventure. Votre présence a rendu ce voyage plus agréable et mémorable.

## À nos famille,

Pour votre soutien moral et vos encouragements. Vous avez toujours cru en moi et m'avez encouragé à poursuivre mes rêves.

## À nos collègues de promotion,

Pour votre esprit d'équipe, vos échanges enrichissants et votre camaraderie. Ensemble, nous avons surmonté de nombreux défis et partagé de nombreuses réussites.

À tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce projet. Votre soutien et votre collaboration ont été essentiels pour faire de cette expérience un moment enrichissant.

# Remerciement

Au terme de ce projet, je tiens à exprimer ma profonde gratitude à **Monsieur Abdelfettah HAIDINE**, notre encadrant, pour sa disponibilité, son accompagnement constant et la qualité de ses conseils. Son suivi attentif et ses orientations précieuses ont grandement contribué à la réussite de ce travail.

J'adresse également mes sincères remerciements à **l'École Nationale des Sciences Appliquées d'El Jadida (ENSAJ)** pour l'encadrement académique et les conditions favorables offertes à la réalisation de ce projet.

Enfin, je remercie toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce projet, ainsi que les membres du jury pour l'attention qu'ils accorderont à l'évaluation de ce travail.

# Résumé

Ce projet présente une étude bibliométrique approfondie portant sur la convergence entre l'Internet des Objets (IoT) et les technologies de réseaux mobiles 4G et 5G. Dans un contexte où la production scientifique mondiale connaît une croissance exponentielle, l'objectif de ce travail est de cartographier l'état de l'art et d'identifier les dynamiques de transition technologique sur la période 2017-2025.

La méthodologie repose sur une extraction rigoureuse de données issues de la base **IEEE Xplore**, traitées via un arsenal logiciel complémentaire : **Microsoft Power BI** pour le nettoyage (ETL) et l'analyse décisionnelle, **Biblioshiny** pour les statistiques descriptives, ainsi que **VOSviewer** et **Gephi** pour la cartographie des réseaux de co-occurrence et de collaboration.

Les résultats mettent en évidence une montée en puissance fulgurante de la thématique, culminant vers une phase de maturité technologique en 2022. L'étude révèle un basculement du leadership géographique vers l'axe **Chine-Inde** et une mutation thématique majeure : la recherche ne se limite plus à la connectivité pure, mais s'oriente désormais vers l'**AIoT** (Intelligence Artificielle des Objets), l'**Edge Computing** et la **sécurité décentralisée**. Ce rapport démontre l'utilité des outils de Business Intelligence pour transformer une masse documentaire complexe en indicateurs stratégiques clairs.

**Mots-clés :** IoT, 5G, 4G, Bibliométrie, Power BI, IEEE Xplore, AIoT, Analyse de réseaux.

# Abstract

This project presents a comprehensive bibliometric study on the convergence of the Internet of Things (IoT) and 4G/5G mobile network technologies. As global scientific production experiences exponential growth, this research aims to map the state-of-the-art and identify the dynamics of technological transition over the 2017-2025 period.

The methodology is based on a rigorous data extraction from the **IEEE Xplore** database, processed through a complementary software suite: **Microsoft Power BI** for data cleaning (ETL) and decision analytics, **Biblioshiny** for descriptive statistics, and **VOSviewer** combined with **Gephi** for mapping co-occurrence and collaboration networks.

The findings highlight a dramatic surge in research interest, reaching a technological maturity phase around 2022. The study reveals a significant shift in geographical leadership toward the **China-India** axis and a major thematic evolution: research is no longer limited to pure connectivity but is now pivoting toward **AIoT** (Artificial Intelligence of Things), **Edge Computing**, and **decentralized security**. This report demonstrates the power of Business Intelligence tools in transforming complex documentary masses into clear, strategic indicators.

**Keywords:** IoT, 5G, 4G, Bibliometrics, Power BI, IEEE Xplore, AIoT, Network Analysis

## Table des matières

Liste des abréviations .....	6
Liste des figures.....	7
Introduction générale.....	9
1 .....	10
Contexte Général du Stage .....	10
<b>Introduction</b> .....	10
<b>1.1. L'Internet des Objets (IoT) : Une révolution de la connectivité massive</b> .....	10
<b>1.2. De la 4G à la 5G : L'évolution technologique du socle réseau</b> .....	10
<b>1.3. La convergence IoT et 5G : Vers l'intelligence artificielle des objets (AIoT)</b> .....	11
<b>1.4. Problématique et nécessité de l'analyse bibliométrique</b> .....	11
<b>1.5. Objectifs de l'étude</b> .....	11
2 .....	12
Méthodologie et Outils utilisés.....	12
<b>Introduction</b> .....	12
<b>2.1 Constitution du Corpus et Stratégie de Recherche</b> .....	12
2.1.1 Sélection de la source : IEEE Xplore .....	12
2.1.2 Équation de recherche et périmètre .....	12
<b>2.2 Le Cadre Bibliométrique : Indicateurs et Enjeux</b> .....	12
<b>2.3 Arsenal Logiciel : Une Approche "Multi-Outils"</b> .....	13
<b>2.4 Workflow Intégré de Traitement des Données</b> .....	14
<b>Conclusion</b> .....	14
3 .....	15
Réalisation et Analyse des résultats.....	15
<b>Introduction</b> .....	15
<b>3.1 Réalisation sous Microsoft Power BI : Intelligence Décisionnelle</b> .....	15
3.1.1 Modélisation des données et processus ETL .....	15
3.1.2 Analyse descriptive globale et indicateurs clés (KPI) .....	16
3.1.3 Analyse temporelle : Dynamique de la transition 4G/5G.....	16
3.1.4 Analyse géographique et leadership national .....	16
3.1.5 Cartographie géospatiale de la production mondiale.....	17
3.1.6 Analyse thématique sémantique (Word Cloud).....	18
3.1.7 Synthèse : La valeur ajoutée de l'interactivité .....	18
<b>3.2 L'outil GEPHI</b> .....	19
3.2.1 Présentation de l'outil GEPHI .....	19
3.2.2 Réalisation de la bibliométrie via l'outil GEPHI.....	21

<b>3.3 Biblioshiny .....</b>	24
<b>3.3.1 Présentation de l'outil Biblioshiny .....</b>	24
<b>3.3.2 Réalisation de la bibliométrie via l'outil BiblioShiny .....</b>	28
<b>3.4 VOSviewer .....</b>	50
<b>3.4.1 Initialisation du projet bibliométrique.....</b>	52
<b>3.4.2 Sélection de la typologie des données.....</b>	52
<b>3.4.3 Importation et parsing du corpus .....</b>	53
<b>3.4.4 Analyse automatique et indexation des champs .....</b>	54
<b>3.4.5 Validation manuelle et nettoyage final .....</b>	55
<b>3.4.6 Analyse des réseaux de mots-clés : Structure et dynamiques.....</b>	56
<b>3.4.7 Analyse des réseaux de co-auteurs : Structure et collaborations.....</b>	59
<b>3.4.7.1 Structure du réseau de collaboration scientifique .....</b>	59
<b>3.4.7.2 Dynamique temporelle et fronts de recherche émergents.....</b>	60
<b>3.4.7.3 Cartographie thermique et pôles d'influence.....</b>	61
<b>3.4.7.4 Analyse des réseaux des pays : Structure et dynamiques géographiques.....</b>	62
<b>3.4.7.5 Structure de la coopération internationale.....</b>	62
<b>3.4.7.6 Basculement géopolitique et émergence asiatique .....</b>	63
<b>3.4.7.7 Pôles d'incandescence et hégémonie scientifique.....</b>	64
Conclusion générale .....	66
Bibliographie .....	67

# *Liste des abréviations*

- **3GPP** : Third Generation Partnership Project
- **4G** : Quatrième Génération de réseaux mobiles
- **5G** : Cinquième Génération de réseaux mobiles
- **AI** : Artificial Intelligence (Intelligence Artificielle)
- **AIoT** : Artificial Intelligence of Things (Intelligence Artificielle des Objets)
- **BI** : Business Intelligence (Informatique Décisionnelle)
- **CSV** : Comma-Separated Values (Valeurs séparées par des virgules)
- **DAX** : Data Analysis Expressions (Langage de formules Power BI)
- **DOI** : Digital Object Identifier (Identifiant numérique d'objet)
- **ENSA** : École Nationale des Sciences Appliquées
- **ETL** : Extract, Transform, Load (Extraction, Transformation, Chargement)
- **IEEE** : Institute of Electrical and Electronics Engineers
- **IoT** : Internet of Things (Internet des Objets)
- **ISIC** : Ingénierie des Systèmes d'Information et de Communication
- **KPI** : Key Performance Indicator (Indicateur de Performance Clé)
- **LPWAN** : Low Power Wide Area Network
- **LTE** : Long Term Evolution
- **M2M** : Machine to Machine
- **MCP** : Multiple Country Publication (Collaboration internationale)
- **MEC** : Mobile Edge Computing
- **QoS** : Quality of Service (Qualité de Service)
- **SCP** : Single Country Publication (Publication nationale unique)
- **UAV** : Unmanned Aerial Vehicle (Drone)
- **UML** : Unified Modeling Language
- **VOS** : Visualization of Similarities
- **WoS** : Web of Science

# Liste des figures

Figure 1 : Logo du PowerBI .....	13
Figure 2 : Logo du Biblioshiny.....	13
Figure 3 : Logo vosViewer .....	14
Figure 4 : Logo du Gephi .....	14
Figure 5 : Structure relationnelle du modèle de données bibliométriques.....	15
Figure 6 : Évolution du volume de publications scientifiques entre 2015 et 2025.....	16
Figure 7 : Répartition proportionnelle de la production scientifique mondiale par pays.....	17
Figure 8 : Cartographie géospatiale mettant en évidence la domination de l'axe Asie-Pacifique.....	17
Figure 9 : Analyse sémantique des thématiques dominantes et émergentes .....	18
Figure 10 : Tableau de bord décisionnel final regroupant l'ensemble des analyses .....	18
Figure 11 : interface de présentation et d'accueil du logiciel Gephi.....	19
Figure 12 : Configuration des paramètres d'importation : Passage du format Scopus à la liste d'adjacence.....	20
Figure 13 : Visualisation Initiale du Graphe Gephi .....	20
Figure 14 : Cartographie du réseau bibliométrique par clusters de modularité. ....	21
Figure 15 : Application des métriques de centralité et mise en évidence des nœuds par degré .....	22
Figure 16 :Sélection des attributs de authors et affichage par nœuds. ....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Figure 17 : Impact de la densité du corpus sur la lisibilité des métadonnées textuelles.....	24
Figure 18 : Interface du BiblioShiny .....	24
Figure 19 : interface de présentation et d'accueil du logiciel Rstudio.....	25
Figure 20 : Configuration des paramètres d'importation .....	26
Figure 21 : Diagnostic de la base de données : Taux de perte et fiabilité des champs bibliographique .....	27
Figure 22 : Interface de Filtrage BiblioShiny .....	28
Figure 23 : Tableau de Bord des Métriques Bibliométriques Principales.....	29
Figure 24 : Évolution de la Production Scientifique Annuelle sur la 4G, 5G et l'IoT.....	30
Figure 25: citation moyenne par an .....	31
Figure 26: Most relevant sources .....	32
Figure 27: Core sources by Bradford's law.....	33
Figure 28: Sources Production over Time .....	34
Figure 29 : Most relevant authors.....	35
Figure 30: Authors production over time .....	36
Figure 31 : Most Relevant Affiliations .....	37
Figure 32: Corresponding Author's Countries .....	39
Figure 33: Most Cited Countries.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Figure 34 : Most Cited Countries.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Figure 35: Countries' Scientific Production.....	41
Figure 36: Countries' Collaboration World Map .....	42
Figure 37: World cloud.....	43
Figure 38: Tree map .....	44
Figure 39: Words' Frequency over Time .....	45
Figure 40 : Trend Topics .....	47
Figure 41: Collaboration Network .....	48
Figure 42: Factorial analysis .....	49
Figure 43 : : Limites techniques et erreurs de génération rencontrées sur Biblioshiny lors du traitement de la base de données volumineuse.....	50
Figure 44 : Interface de présentation et d'accueil du logiciel VOSviewer.....	51
Figure 45 : Assistant de création de carte (Create Map) .....	52
Figure 46 : Sélection du mode d'analyse "Données bibliographiques .....	53
Figure 47 : Importation du fichier de données bibliographiques.....	53
Figure 48 : Reconnaissance et validation automatique des métadonnées .....	54
Figure 49 : Configuration des seuils de filtrage et réduction du corpus .....	55
Figure 50 : Interface de validation manuelle des auteurs sélectionnés.....	55

Figure 51 : Cartographie des clusters thématiques (VOSviewer) .....	56
Figure 52 : Dynamique temporelle et fronts de recherche récents .....	57
Figure 53 : Carte de densité thermique des thématiques de recherche.....	59
Figure 54 : Structure des collaborations scientifiques (31 clusters identifiés).....	60
Figure 55 : Dynamique temporelle des collaborations (2019-2023).....	61
Figure 56 : Carte thermique de l'activité scientifique des auteurs.....	62
Figure 57 : Cartographie mondiale des collaborations (101 pays, 10 clusters) .....	63
Figure 58 : Dynamique temporelle : Le déplacement du centre de gravité vers l'Asie .....	64
Figure 59 : Carte de densité : Hégémonie de la Chine et de l'Inde.....	65

# Introduction générale

Dans le paysage technologique actuel, la connectivité est devenue le socle fondamental de toute innovation numérique. Au cœur de cette transformation, l'Internet des Objets (IoT) s'est imposé comme un paradigme majeur, faisant passer les objets physiques d'un état passif à celui d'agents intelligents et interconnectés. Toutefois, cette révolution ne peut atteindre son plein potentiel sans une infrastructure réseau capable de supporter des milliards de connexions. Si la quatrième génération de réseaux mobiles (4G/LTE) a réussi à démocratiser l'accès à l'internet mobile, la 5G marque une rupture technologique conçue spécifiquement pour répondre aux exigences critiques de l'IoT : latence ultra-faible, haute densité de connexion et fiabilité accrue.

Cette convergence entre l'IoT et les réseaux mobiles a déclenché une production scientifique d'une ampleur sans précédent. Pour les chercheurs et les ingénieurs, cette profusion de publications crée un défi majeur de saturation informationnelle. Il devient complexe d'appréhender l'état de l'art, d'identifier les thématiques émergentes ou de repérer les pôles de puissance qui dictent les standards de demain.

C'est dans ce cadre que s'inscrit le présent projet. Notre étude se propose de réaliser une analyse bibliométrique approfondie de la transition technologique de la 4G vers la 5G dans le contexte de l'IoT sur la période charnière allant de 2017 à 2025. La bibliométrie, par l'application de méthodes statistiques aux métadonnées savantes, nous permet de transformer une masse documentaire brute en une cartographie stratégique et décisionnelle.

La problématique centrale de ce travail est de comprendre la dynamique de cette recherche mondiale : **Comment la littérature scientifique a-t-elle accompagné cette évolution technologique et quelles sont les tendances thématiques et géographiques qui structurent aujourd'hui ce domaine ?**

Pour répondre à cette problématique, le présent rapport s'articule autour de plusieurs axes méthodiques : le premier chapitre définit le contexte technique de l'IoT et des réseaux mobiles, tandis que le second détaille l'approche bibliométrique et la stratégie rigoureuse de collecte des données effectuée sur la base IEEE Xplore. Le troisième chapitre expose les outils et la méthodologie logicielle adoptée, ouvrant la voie au quatrième chapitre, consacré à la réalisation, où sont analysés les résultats obtenus via l'utilisation combinée de Power BI, Gephi, Biblioshiny et VOSviewer. Enfin, une conclusion générale et des perspectives viendront clore cette étude en ouvrant sur les futurs enjeux de la 6G.

# 1

## Contexte Général du Stage

### Introduction

Le paysage numérique mondial connaît une mutation sans précédent, portée par une prolifération massive d'objets connectés et une exigence de connectivité toujours plus grande. Ce chapitre définit les concepts clés de l'Internet des Objets (IoT) et retrace l'évolution des réseaux mobiles, de la maturité de la 4G à la rupture technologique de la 5G, afin de situer les enjeux de leur convergence.

#### 1.1. L'Internet des Objets (IoT) : Une révolution de la connectivité massive

L'Internet des Objets (IoT) ne se limite plus aujourd'hui à de simples capteurs isolés. Il représente un écosystème global où des milliards d'objets physiques, des dispositifs industriels aux appareils domestiques sont interconnectés pour collecter, échanger et traiter des données. En 2025, on estime que le nombre d'objets connectés dépasse les 30 milliards à l'échelle mondiale. Cette omniprésence transforme radicalement des secteurs vitaux :

- **L'Industrie 4.0** : Automatisation intelligente et maintenance prédictive.
- **Les Smart Cities** : Gestion optimisée de l'énergie, du trafic urbain et de la sécurité publique.
- **La Santé Connectée** : Télémédecine et surveillance des patients en temps réel. Cependant, cette expansion massive repose sur un impératif critique : une infrastructure réseau capable de supporter une telle densité de trafic.

#### 1.2. De la 4G à la 5G : L'évolution technologique du socle réseau

La connectivité est l'élément vital de l'IoT, et son évolution est intrinsèquement liée aux générations de réseaux mobiles.

- **La 4G (LTE - Long Term Evolution)** : Bien qu'elle ait permis la démocratisation de l'internet mobile pour les usagers humains et supporté les premiers déploiements IoT, la 4G atteint ses limites théoriques. Sa latence (environ 30 à 50 ms) et sa capacité de gestion d'objets au kilomètre carré ne suffisent plus aux exigences de l'IoT massif.
- **La 5G** : Elle marque une rupture majeure. Contrairement aux générations précédentes, la 5G a été conçue "nativement" pour les machines. Elle apporte trois avancées fondamentales :
  1. **mMTC (Massive Machine-Type Communications)** : Capacité de connecter jusqu'à 1 million d'appareils par
  2. **uRLLC (Ultra-Reliable Low-Latency Communications)** : Réduction de la latence à moins de 1 ms, indispensable pour les missions critiques (véhicules autonomes, chirurgie).

3. **eMBB (Enhanced Mobile Broadband)** : Débits ultra-rapides pouvant atteindre 20 Gbps.

### 1.3. La convergence IoT et 5G : Vers l'intelligence artificielle des objets (AIoT)

La fusion de l'IoT et de la 5G crée une synergie unique qui dépasse la simple transmission de données. Nous assistons à l'émergence de l'**AIoT (Artificial Intelligence of Things)**. Grâce à la 5G, le traitement des données peut désormais s'effectuer en périphérie du réseau (**Edge Computing**), permettant une prise de décision instantanée par l'intelligence artificielle sans dépendre de serveurs cloud lointains. Cette convergence fait de l'infrastructure mobile le véritable système nerveux d'une société hyper-connectée, autonome et sécurisée.

### 1.4. Problématique et nécessité de l'analyse bibliométrique

Face à cette accélération technologique, la production scientifique a connu une croissance exponentielle entre 2017 et 2025. Cette abondance de travaux crée une opacité informationnelle : il devient difficile pour les chercheurs d'identifier les fronts de recherche dominants ou les acteurs clés.

La problématique centrale de notre étude est donc de comprendre : **Comment la littérature scientifique a-t-elle accompagné cette transition de la 4G vers la 5G dans le contexte de l'IoT, et quels sont les défis (sécurité, énergie, IA) qui façonnent aujourd'hui ce domaine ?** L'analyse bibliométrique devient ici un outil stratégique indispensable pour cartographier cette complexité et en extraire des tendances exploitables.

### 1.5. Objectifs de l'étude

Pour répondre à cette problématique, notre travail se fixe les objectifs suivants :

- **Cartographier l'évolution de la recherche** : Suivre la trajectoire de la production scientifique pour identifier les cycles de vie des technologies.
- **Identifier les tendances temporelles** : Situer le moment précis où l'intérêt pour la 5G a surpassé celui de la 4G dans la littérature.
- **Analyser les défis thématiques** : Déterminer les mots-clés dominants pour comprendre les verrous techniques actuels, notamment la sécurité, l'efficacité énergétique et l'intelligence artificielle.
- **Repérer les acteurs majeurs de l'innovation** : Identifier et classer les auteurs, les pays et les institutions les plus influents qui dictent le rythme de l'innovation

# 2

# Méthodologie et Outils utilisés

## Introduction

La fiabilité d'une étude portant sur des milliers de documents repose sur la robustesse de son protocole. Ce chapitre expose la démarche scientifique adoptée pour transformer une masse documentaire brute en une cartographie stratégique. Il détaille la stratégie de constitution du corpus sur la base IEEE Xplore, définit le cadre théorique de la bibliométrie et présente l'arsenal logiciel mobilisé pour le traitement et la visualisation des données.

### 2.1 Constitution du Corpus et Stratégie de Recherche

#### 2.1.1 Sélection de la source

Pour une étude centrée sur la convergence entre l'IoT et les réseaux mobiles (4G/5G), la base de données Scopus (Elsevier) s'est imposée comme la source de référence majeure. Reconnue mondialement comme l'une des plus vastes bases de données de résumés et de citations de littérature évaluée par les pairs, elle garantit une couverture exhaustive incluant les publications de l'IEEE, de Springer et d'Elsevier. Ce choix stratégique nous a permis d'accéder à des métadonnées de haute qualité, indispensables pour une analyse bibliométrique rigoureuse, tout en assurant que les travaux sélectionnés ont été validés par des comités de lecture d'excellence.

#### 2.1.2 Équation de recherche et périmètre

Afin d'isoler les publications traitant spécifiquement de l'interconnexion entre les objets et les réseaux cellulaires de nouvelle génération, nous avons formulé une requête booléenne précise :

**Requête :** ("Internet of Things" OR "IoT") AND ("5G" OR "4G" OR "LTE" OR "Long Term Evolution")

Le périmètre de l'étude a été délimité selon les critères suivants :

- **Horizon temporel** : De **2017 à 2025**, couvrant la transition technologique du LTE vers le déploiement massif de la 5G.
- **Typologie des documents** : Articles de revues (Journals) et communications de conférences (Conference Papers).
- **Langue** : Publications anglophones pour assurer l'uniformité des analyses sémantiques.

### 2.2 Le Cadre Bibliométrique : Indicateurs et Enjeux

L'analyse bibliométrique consiste à appliquer des méthodes mathématiques et statistiques à la littérature scientifique pour évaluer l'état d'un domaine. Notre méthodologie repose sur trois piliers analytiques :

- **Indicateurs de productivité** : Mesure du volume de publications (par année, pays, auteur) pour identifier la vitalité du sujet.
- **Indicateurs d'impact** : Analyse du nombre de citations pour évaluer l'autorité scientifique des travaux et identifier les articles "piliers".
- **Indicateurs relationnels** : Étude des co-occurrences de mots-clés et du co-autorat pour visualiser la structure intellectuelle et sociale (clusters) du domaine.

## 2.3 Arsenal Logiciel : Une Approche "Multi-Outils"

La complexité des données nécessite l'utilisation d'une suite logicielle complémentaire, chaque outil répondant à un besoin spécifique du cycle d'analyse :

- **Microsoft Power BI** : Utilisé comme pivot de **Business Intelligence**. Son rôle est d'assurer la phase **ETL** (Nettoyage, transformation et chargement) via Power Query et de générer des tableaux de bord interactifs permettant de corrélérer dynamiquement le temps, la géographie et les auteurs.



Figure 1 : Logo du PowerBI

- **Biblioshiny (Bibliometrix)** : Interface basée sur le langage R, elle est l'outil de référence pour les statistiques descriptives savantes, permettant de calculer les taux de croissance annuels et de vérifier les lois bibliométriques (Loi de Bradford).



Figure 2 : Logo du Biblioshiny

- **VOSviewer** : Logiciel spécialisé dans la cartographie scientifique basée sur la distance. Il permet d'identifier visuellement les clusters thématiques et l'évolution temporelle des mots-clés.

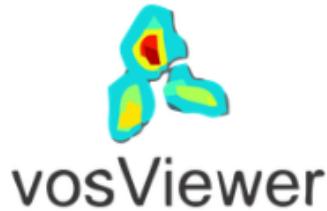


Figure 3 : Logo vosViewer

- **Gephi** : Outil de visualisation de réseaux complexes, utilisé pour l'analyse topologique des graphes (métriques de centralité et de modularité) afin de comprendre les interactions profondes entre les acteurs de la recherche.



Figure 4 : Logo du Gephi

## 2.4 Workflow Intégré de Traitement des Données

La transformation des données brutes en connaissances exploitables suit un flux de travail structuré :

1. **Phase de Raffinement (Power BI)** : Normalisation des métadonnées, suppression des doublons et extraction des pays à partir des affiliations.
2. **Phase Descriptive (Biblioshiny)** : Génération des classements de productivité et analyse de l'impact des citations.
3. **Phase Cartographique (VOSviewer & Gephi)** : Déploiement des algorithmes de spatialisation pour faire émerger les tendances technologiques (AIoT, Edge Computing, Blockchain).

## Conclusion

La synergie entre une stratégie de collecte ciblée et une suite logicielle performante garantit la pertinence de nos analyses. Ce cadre méthodologique étant posé, nous pouvons désormais passer à la phase de **Réalisation**, où les résultats issus de ces différents outils seront exposés et interprétés pour décrypter l'avenir de la convergence IoT-5G.

# Réalisation et Analyse des résultats

## Introduction

Ce chapitre constitue le cœur de notre étude. Il présente les résultats concrets issus du traitement bibliométrique et propose une interprétation critique des tendances détectées. Nous débuterons par l'analyse descriptive et décisionnelle réalisée sous Microsoft Power BI, avant de détailler les analyses de réseaux effectuées par nos collaborateurs via Gephi, Biblioshiny et VOSviewer.

### 3.1 Réalisation sous Microsoft Power BI : Intelligence Décisionnelle

L'utilisation de Power BI a permis de poser les bases analytiques du projet en transformant le corpus brut d'IEEE Xplore en un environnement interactif. Cette phase s'est articulée autour du nettoyage des données, de la création d'indicateurs clés (KPI) et de la visualisation multidimensionnelle.

#### 3.1.1 Modélisation des données et processus ETL

Avant toute visualisation, une phase rigoureuse de préparation des données a été menée via le module **Power Query**. Nous avons procédé au fractionnement (splitting) des colonnes complexes pour isoler chaque auteur et chaque mot-clé. Les données ont ensuite été structurées selon un modèle relationnel optimisé, permettant de garantir l'intégrité des calculs malgré la multiplicité des entrées par article.

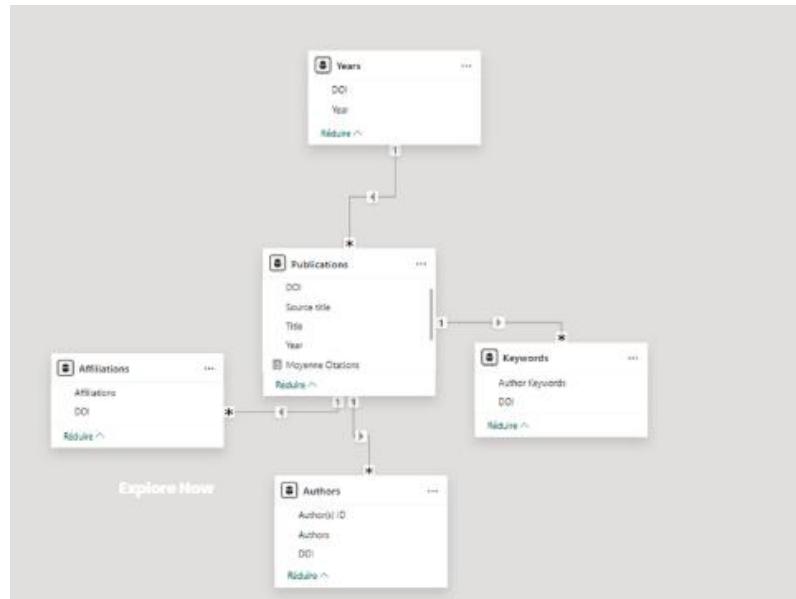


Figure 5 : Structure relationnelle du modèle de données bibliométriques.

### 3.1.2 Analyse descriptive globale et indicateurs clés (KPI)

La première étape de l'analyse a consisté à quantifier l'ampleur de la recherche. En utilisant des "cartes" de données, nous avons extrait les métriques fondamentales du corpus. Ces chiffres confirment que la convergence IoT-5G n'est plus un sujet de niche, mais un domaine de recherche massif et mondialisé, soutenu par un volume de citations témoignant d'un fort impact scientifique.

### 3.1.3 Analyse temporelle : Dynamique de la transition 4G/5G

L'analyse de l'évolution annuelle des publications met en évidence le cycle de vie des technologies. On observe une croissance exponentielle à partir de 2017, marquant le basculement de la recherche théorique vers le déploiement opérationnel de la 5G. Cette courbe illustre parfaitement comment la 5G a progressivement supplanté la 4G comme socle technologique prioritaire pour le développement de l'Internet des Objets.

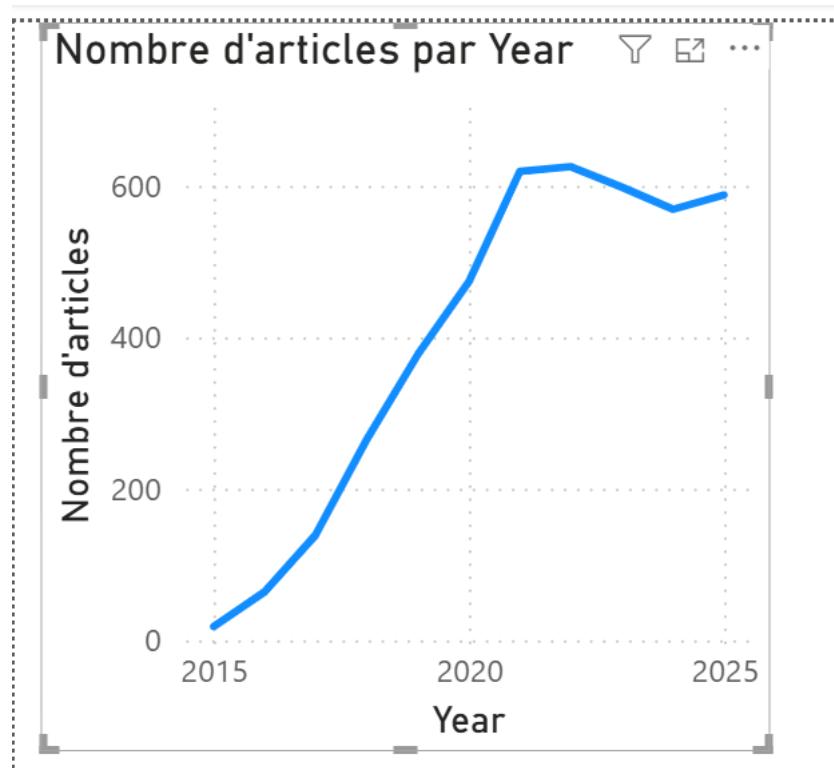
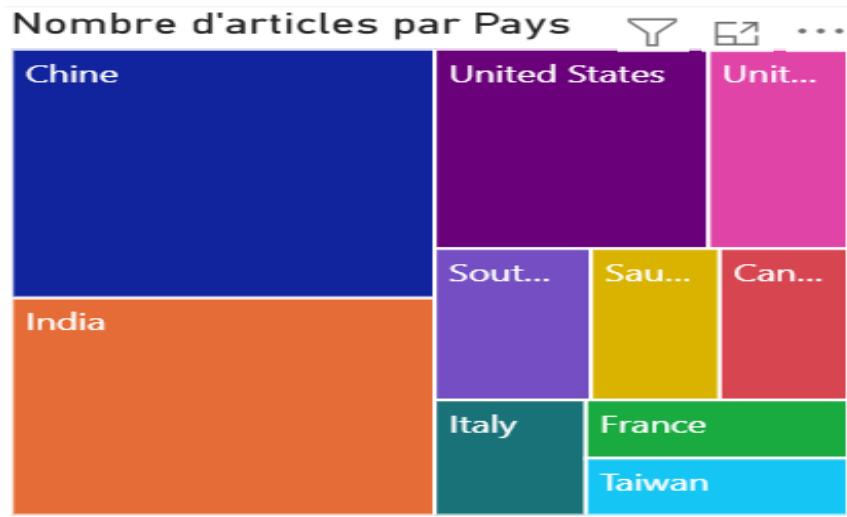


Figure 6 : Évolution du volume de publications scientifiques entre 2015 et 2025

### 3.1.4 Analyse géographique et leadership national

Grâce au **Treemap**, nous avons cartographié la hiérarchie mondiale de la recherche. L'analyse révèle une domination écrasante de l'axe Asie-Pacifique. La **Chine** et l'**Inde** s'imposent comme les leaders incontestés en volume de production, devançant les pôles historiques comme les États-Unis. Ce visuel permet de saisir instantanément le poids relatif de chaque nation dans l'effort d'innovation mondial.

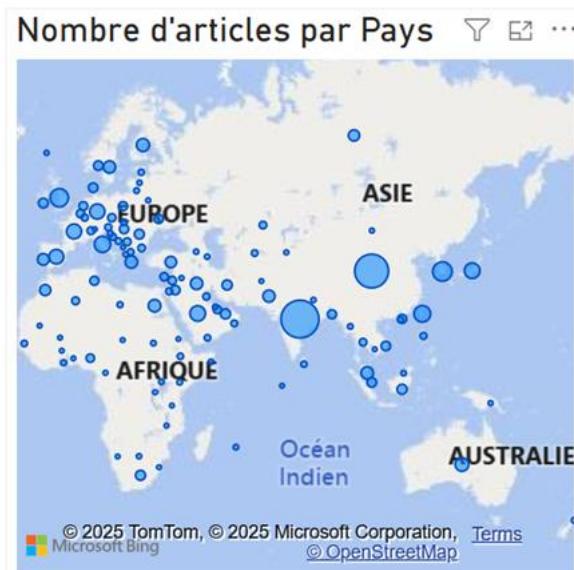


**Figure 7 : Répartition proportionnelle de la production scientifique mondiale par pays.**

### 3.1.5 Cartographie géospatiale de la production mondiale

De plus, cette carte de densité mondiale illustre l'étendue planétaire de la recherche sur la convergence IoT et 5G. La taille des bulles, proportionnelle au volume de publications, confirme que l'épicentre de l'innovation se situe désormais en **Asie**, avec une hégémonie visuelle de l'**Inde** et de la **Chine**.

En parallèle, l'**Europe** présente une distribution plus granulaire mais très dense, témoignant d'une collaboration active entre de multiples centres de recherche nationaux. L'**Amérique du Nord** conserve une position de pilier historique, tandis que l'on observe l'émergence de foyers d'activité significatifs au Moyen-Orient et en Afrique. Cette visualisation géographique prouve que le développement des futurs standards de communication (5G/6G) est un enjeu de compétition et de coopération mondiale, impliquant tous les continents dans la construction de l'infrastructure numérique de demain.



**Figure 8 : Cartographie géospatiale mettant en évidence la domination de l'axe Asie-Pacifique.**

### 3.1.6 Analyse thématique sémantique (Word Cloud)

Le nuage de mots-clés réalisé sous Power BI permet de décrypter les véritables verrous technologiques actuels. Au-delà des termes "IoT" et "5G", l'émergence massive de mots tels que "**Machine Learning**", "**Edge Computing**" et "**Security**" confirme que la recherche actuelle s'oriente vers une **Intelligence Artificielle des Objets (AIoT)**, où la performance réseau se conjugue avec l'intelligence distribuée et la protection des données.



Figure 9 : Analyse sémantique des thématiques dominantes et émergentes.

### 3.1.7 Synthèse : La valeur ajoutée de l'interactivité

Le point fort de cette réalisation sous Power BI réside dans l'**interactivité dynamique**. Contrairement à un rapport statique, ce tableau de bord permet une exploration multidimensionnelle : en cliquant sur un pays ou un auteur, l'ensemble des indicateurs s'ajuste en temps réel. Cette capacité de filtrage croisé a été déterminante pour valider les corrélations entre les acteurs géographiques et les spécialisations thématiques.



Figure 10 : Tableau de bord décisionnel final regroupant l'ensemble des analyses

## 3.2 L'outil GEPHI

### 3.2.1 Présentation de l'outil GEPHI

L'outil Gephi occupe une place prépondérante dans l'analyse bibliométrique moderne en tant que plateforme de référence pour la visualisation et l'exploration de données relationnelles. Contrairement aux outils statistiques classiques qui fournissent des tableaux, Gephi transforme les données issues de bases comme Scopus ou Web of Science en graphes dynamiques. Chaque entité (auteur, mot-clé, pays) est représentée par un nœud, et chaque relation (co-publication, co-occurrence) par un lien.

Voici les piliers fondamentaux qui font de Gephi un outil d'analyse puissant :

- **Spatialisation et Algorithmes de Force** : Gephi utilise des algorithmes tels que *ForceAtlas2* ou *Fruchterman-Reingold* pour organiser le réseau. Ces modèles simulent des forces physiques où les nœuds fortement liés s'attirent et les nœuds non reliés se repoussent, permettant de voir émerger naturellement des clusters ou communautés thématiques.
- **Métriques de Centralité** : Le logiciel calcule des indicateurs mathématiques complexes pour identifier les leaders d'un domaine. La centralité de degré révèle les acteurs les plus prolifiques, tandis que la centralité d'intermédiairité (*betweenness centrality*) met en lumière les "passeurs" qui font le pont entre deux domaines de recherche différents.
- **Analyse de Communauté (Modularité)** : Gephi est capable de détecter des sous-groupes au sein d'un vaste réseau grâce au calcul de la modularité. Cela permet de segmenter une recherche globale en sous-thématiques spécifiques (par exemple, séparer les recherches sur le "Machine Learning" de celles sur la "Sécurité Réseau" au sein d'un graphe général sur l'IoT).

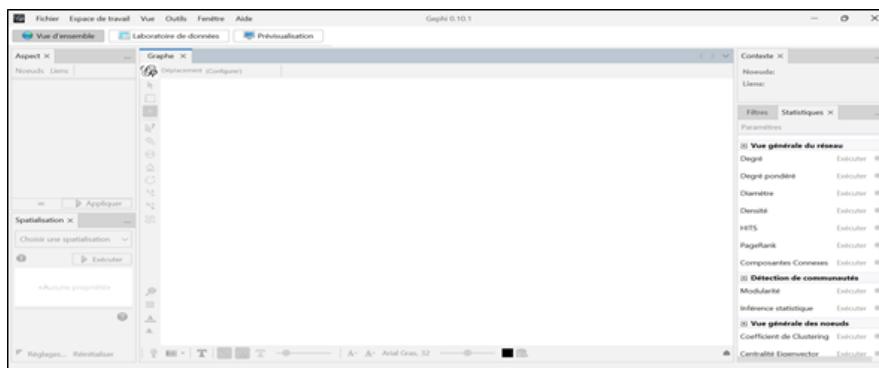


Figure 11 : interface de présentation et d'accueil du logiciel Gephi

#### 3.2.1.1 Initialisation du projet bibliométrique

Pour finaliser l'analyse technique, l'importation des données dans Gephi suit une procédure rigoureuse permettant de transformer les données bibliographiques en réseau exploitable. Tout d'abord, il convient de sélectionner le fichier CSV souhaité, préalablement extrait de la base de données Scopus. Lors de l'ouverture dans Gephi, une étape cruciale consiste à configurer les options générales : il faut importer le fichier en veillant à sélectionner l'option « Liste d'adjacence » dans le champ « Importer en tant que ». Ce paramétrage permet au logiciel d'interpréter correctement les relations entre les entités (auteurs ou mots-clés) et de générer la structure du graphe nécessaire à la visualisation des interactions scientifiques.

**Options générales du CSV (1 sur 2)**

Choisissez un fichier CSV à importer :

Séparateur : Importer en tant que : Encodage :

Virgule Liste d'adjacence UTF-8

Prévisualisation :

Authors	Author full ...	Author(s) ID	Title	Year	Source title	Volume	Issue
Manikanda...	Manikanda...	57219859...	Enhanced P...	2025	Tehnicki Vj...	32	1
Rahman, M...	Rahman, M...	57190261...	Dual band ...	2025	Physics Lett...	563	
Chandran, ...	Chandran, ...	57217124...	Blockchain ...	2025	Engineerin...	161	
D, M.; D, T....	D, Maya (6...	60172284...	Trust-awar...	2025	Knowledge...	331	
Khan, M.J.; ...	Khan, Moh...	57467554...	Secrecy out...	2025	Scientific R...	15	1
Zhong, Y.; ...	Zhong, Yi (...	37035624...	Integrating ...	2025	Discover In...	5	1
Prasad, K.S....	Prasad, Kas...	59250957...	A two-tier ...	2025	Scientific R...	15	1
Kang, M.-J....	Kang, Mye...	58872078...	CMA-Base...	2025	Scientific R...	15	1
Rahman, M...	Rahman, M...	57190261...	3D highly i...	2025	Scientific R...	15	1
Anand, M.; ...	Anand, M. (...	59592214...	Evaluation ...	2025	Proceeding...	239	6

< Précédent Suivant > Terminer Annuler Aide

Figure 12 : Configuration des paramètres d'importation : Passage du format Scopus à la liste d'adjacence

### 3.2.1.2 Visualisation Initiale du Graphe Geph

Cette figure illustre l'étape critique de la première visualisation brute au sein de l'interface Gephi. Immédiatement après l'importation des données bibliographiques, le logiciel génère une vue d'ensemble où la structure relationnelle est déjà mathématiquement présente, comme l'indiquent les statistiques du volet « Contexte » affichant un volume massif de 162 193 nœuds et 280 669 liens. Cependant, à ce stade, le graphe apparaît sous la forme d'un bloc noir opaque et illisible : cela est dû au fait que tous les éléments sont superposés au centre de l'espace de travail, aucune coordonnée spatiale n'ayant encore été attribuée aux nœuds.

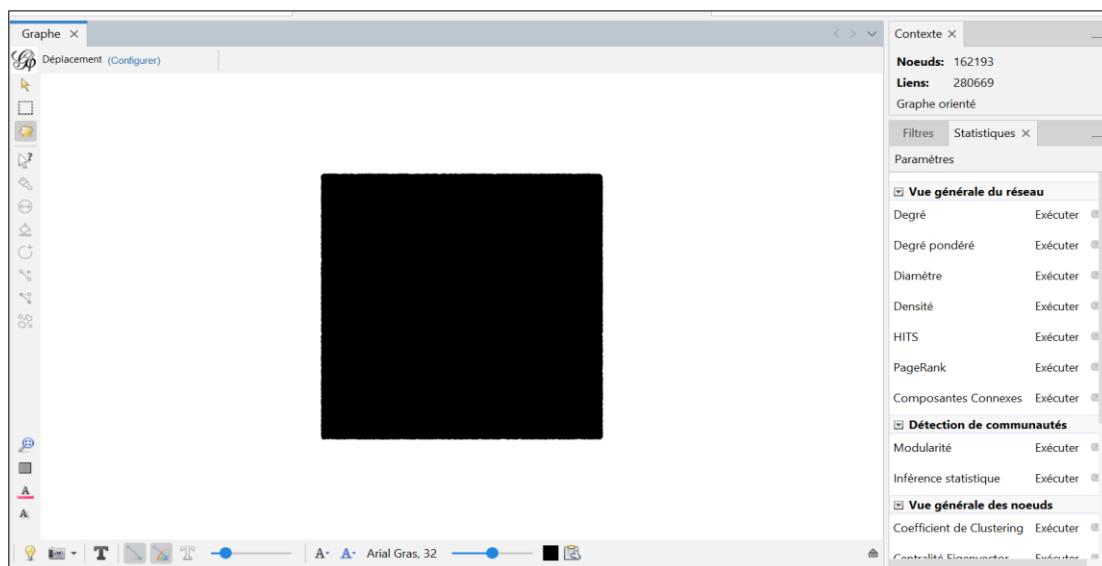


Figure 13 : Visualisation Initiale du Graphe Geph

### 3.2.2 Réalisation de la bibliométrie via l'outil GEPHI

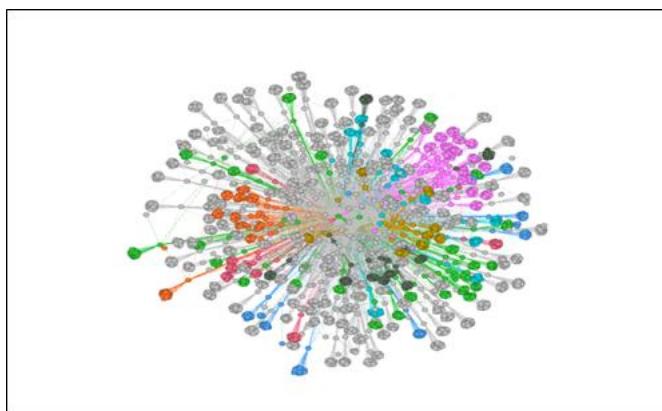
#### 3.2.2.1 Cartographie relationnelle et détection de clusters par modularité

L'image finale obtenue sous Gephi constitue l'aboutissement du traitement spatial et statistique des données bibliométriques, transformant un amas de données brutes en une cartographie de réseau structurée et intelligible. Contrairement à la vue initiale, l'application d'un algorithme de force a permis de déployer le réseau : les entités les plus connectées migrent vers le centre de la visualisation, tandis que les groupes plus spécifiques se positionnent en périphérie.

Voici les éléments clés permettant de décrypter la structure de ce réseau :

- Analyse des Clusters (Modularité) : Les couleurs distinctes correspondent aux classes de modularité calculées par Gephi, identifiant mathématiquement des communautés de recherche ou des pôles thématiques isolés.
- Poids des Nœuds et des Liens : La taille des nœuds est proportionnelle à leur importance (souvent le degré de connectivité), mettant en relief les acteurs pivots ou les mots-clés hégémoniques qui structurent le domaine.
- Interconnexions Thématiques : La densité des liens (edges) entre différents clusters révèle le degré d'interdisciplinarité, montrant comment des thématiques comme l'intelligence artificielle s'intègrent aux infrastructures réseau.

Cette représentation graphique permet d'explorer en profondeur l'organisation de l'information scientifique, mettant en évidence la cohésion des groupes de travail et l'émergence de sujets connexes au sein du corpus global.



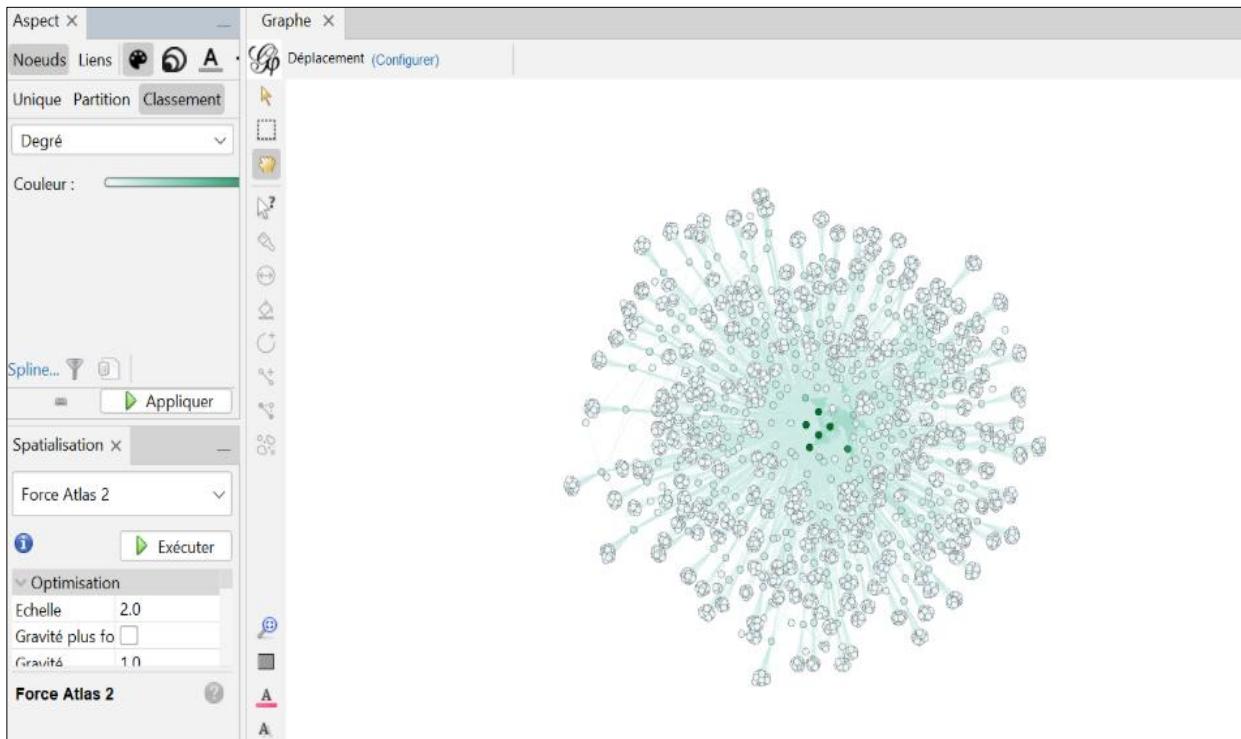
**Figure 14 : Cartographie du réseau bibliométrique par clusters de modularité.**

#### 3.2.2.2 Identification des Acteurs Clés : Visualisation du Degré pour les Nœuds Importants du Graphe

L'étape de classement des nœuds dans Gephi constitue une phase analytique fondamentale pour hiérarchiser l'information au sein d'un réseau bibliométrique. Ce processus s'appuie généralement sur la métrique du Degré, qui mesure le nombre de connexions directes de chaque entité. En configurant les attributs visuels tels que la couleur et la taille en fonction de cette valeur, il devient possible de distinguer immédiatement la structure de pouvoir ou d'influence au sein du corpus.

Voici les points clés de cette procédure :

- Mise en relief des acteurs pivots : Les nœuds possédant le plus de liens, tels que les auteurs les plus prolifiques ou les mots-clés les plus récurrents, sont mis en évidence par une coloration plus intense et une taille élargie.
- Identification des thématiques centrales : Cette pondération visuelle permet de séparer les concepts dominants qui structurent la recherche des thématiques plus périphériques ou émergentes.
- Lisibilité du réseau : En appliquant un dégradé de couleurs (du plus clair au plus foncé), l'analyse gagne en clarté, offrant une lecture intuitive de l'importance relative de chaque élément sans avoir à consulter les tables de données brutes.
- Cette approche transforme ainsi un graphe uniforme en une carte de chaleur dynamique où les pôles majeurs de la connaissance scientifique ressortent visuellement.



**Figure 15 : Application des métriques de centralité et mise en évidence des nœuds par degré**

### 3.2.2.4 Configuration des Étiquettes de Nœuds : Choix des Attributs pour la Visualisation

Pour optimiser la clarté d'un réseau complexe, la configuration des métadonnées textuelles constitue une étape charnière de l'analyse. Une fois le réseau spatialisé, il est primordial de définir l'attribut informatif que l'on souhaite projeter sur le graphe, tel que le nom des auteurs, les titres de publications ou l'année de parution.

Cependant, pour obtenir un affichage correct des étiquettes et éviter les erreurs de lecture des données, une distinction technique doit être opérée lors de la phase de paramétrage :

- Choix de la source des labels : Pour que les noms (comme les auteurs) s'affichent correctement sur chaque cercle, il est nécessaire de sélectionner l'option « Nœud » au lieu de « Liste d'adjacence » dans les paramètres de texte.
- Gestion de la densité : L'utilisation de bases de données volumineuses entraîne mécaniquement une saturation visuelle. Sans le choix du bon attribut au niveau des nœuds, le chevauchement des informations rend l'identification des sources impossible en raison de la richesse du corpus.

- Flexibilité de l'affichage : Cette méthode permet de basculer dynamiquement entre différents identifiants (Year, Title, Source) afin d'explorer le réseau sous plusieurs angles analytiques.

En appliquant ce réglage spécifique sur les nœuds, l'utilisateur s'assure que chaque point du réseau porte l'étiquette correspondante, facilitant ainsi le passage d'une vision structurelle à une identification précise des entités scientifiques.

En appliquant ce réglage spécifique sur les nœuds, l'utilisateur s'assure que chaque point du réseau porte l'étiquette correspondante, facilitant ainsi le passage d'une vision structurelle à une identification précise des entités scientifiques.



**Figure 16 : Sélection des attributs de authors et affichage par nœuds.**

### 3.2.2.5 Défi de Visualisation: Chevauchement et Densité des Étiquettes de Nœuds

L'un des défis majeurs lors de la représentation graphique de réseaux complexes est le phénomène de chevauchement des étiquettes, qui peut gravement nuire à l'interprétation des données. Cette problématique survient généralement lorsque la densité du réseau est élevée ou que les noms des entités (auteurs, thématiques ou publications) sont particulièrement longs. À une échelle globale, la concentration des nœuds crée une saturation visuelle où les textes se superposent, rendant l'identification individuelle des éléments quasiment impossible.

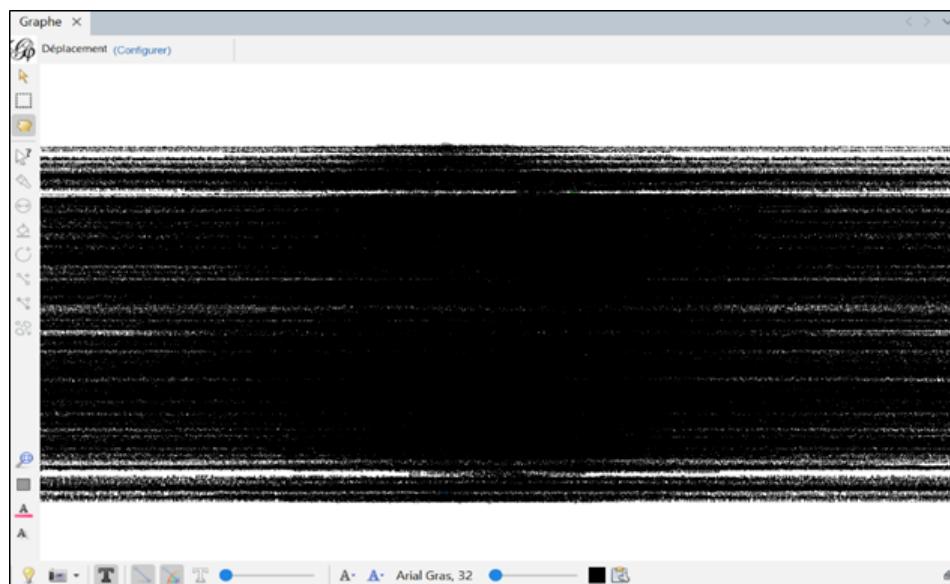


Figure 17 : Impact de la densité du corpus sur la lisibilité des métadonnées textuelles

### 3.3 Biblioshiny

#### 3.3.1 Présentation de l'outil Biblioshiny

Biblioshiny est une interface web interactive basée sur le package R Bibliometrix, conçue pour réaliser des analyses bibliométriques de manière simple et intuitive. Cet outil permet d'importer des données issues de Scopus, ou Web of Science, puis de les convertir, nettoyer et analyser sans écrire de code. Grâce à ses fonctionnalités visuelles, Biblioshiny génère automatiquement des indicateurs bibliométriques et des graphiques professionnels tels que l'évolution annuelle des publications, les réseaux de co-auteurs, la co-citation, la co-occurrence des mots-clés ou encore les cartes thématiques. Entièrement basé sur une interface graphique, Biblioshiny est particulièrement adapté aux analyses scientifiques, notamment pour étudier les tendances de recherche sur des technologies comme la 4G,

la 5G ou  
l'IoT.

Figure 18 : Interface du BiblioShiny

### 3.3.1.1 RStudio

Pour utiliser pleinement Biblioshiny et accéder à son interface interactive, il est nécessaire de passer par RStudio, qui sert d'environnement de lancement et de gestion des packages R. RStudio est en effet l'environnement de développement intégré (IDE) utilisé pour exécuter et gérer les outils développés avec le langage R, dont Bibliometrix et Biblioshiny. Il offre une interface complète comprenant une console, un éditeur de script, un espace d'affichage des graphiques et un gestionnaire de fichiers, ce qui facilite le travail statistique et l'analyse des données. Dans le cadre de la bibliométrie, RStudio permet d'installer le package Bibliometrix et d'accéder à Biblioshiny via une interface web interactive. Même si aucune ligne de code n'est nécessaire pour utiliser Biblioshiny, RStudio reste indispensable pour lancer l'application et gérer l'environnement R. Grâce à sa simplicité d'utilisation et ses outils intégrés, il constitue ainsi une plateforme efficace pour réaliser des analyses bibliométriques complètes.

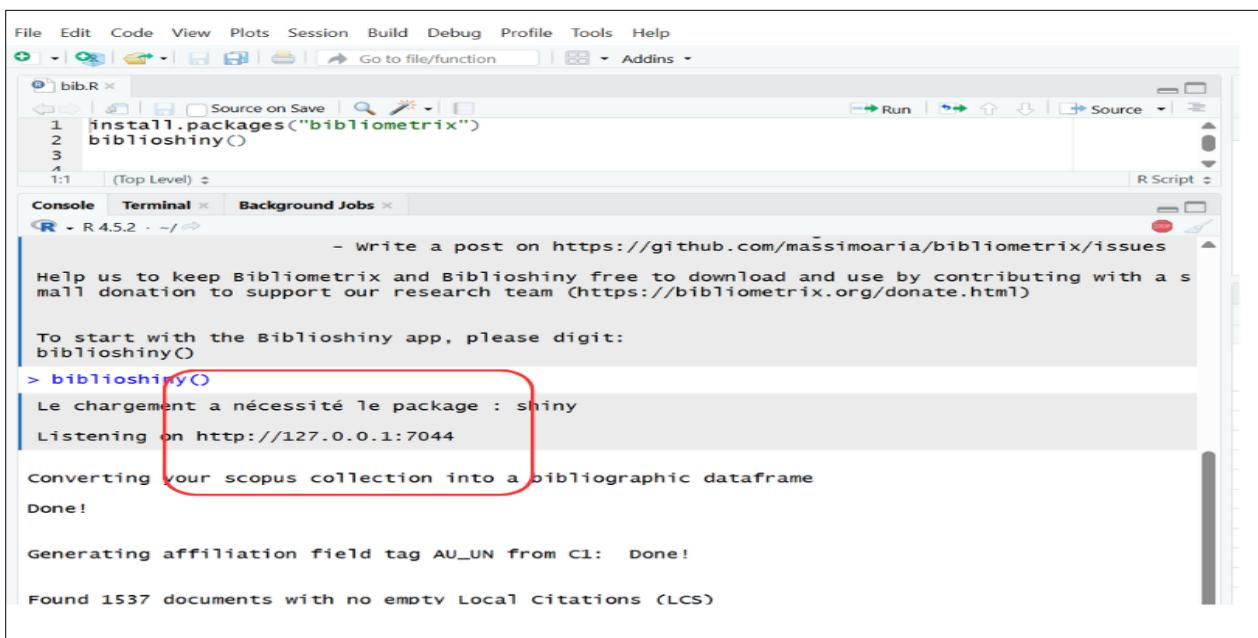


Figure 19 : interface de présentation et d'accueil du logiciel Rstudio

### 3.3.1.2 Importation des données

L'importation des données constitue la première étape essentielle dans une analyse bibliométrique avec Bibliometrix ou Biblioshiny. Après avoir collecté les publications depuis une base de données scientifique telle que Scopus ou Web of Science, les résultats doivent être exportés dans un format compatible CSV. Une fois le fichier obtenu, il est importé dans Biblioshiny via l'onglet "Data → Import", où l'outil reconnaît automatiquement les métadonnées (titres, auteurs, mots-clés, résumés, sources, références citées...), puis sauvegarder le fichier converti via "Save Data", afin de permettre l'exécution de toutes les analyses bibliométriques. Cette étape d'importation garantit que l'ensemble des informations bibliographiques est correctement structuré et exploitable pour la suite de l'analyse.

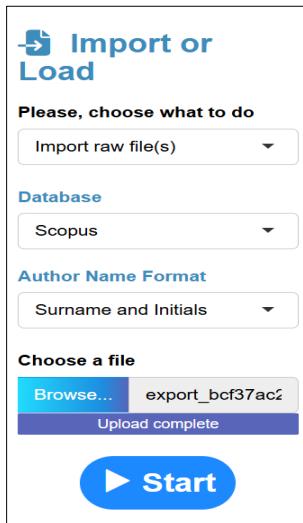


Figure 20 : Configuration des paramètres d'importation

### 3.3.1.3 Analyse de la complétude des métadonnées sous BiblioShiny

Cette phase constitue une étape cruciale de contrôle qualité avant tout traitement bibliométrique. Le tableau de bord permet d'évaluer la fiabilité de la base de données en mesurant le taux d'informations manquantes pour chaque champ de métadonnées.

Voici une analyse détaillée de l'état du corpus :

- Métadonnées Fondamentales (Statut Excellent) : Les champs essentiels à l'identification des documents, tels que le résumé (AB), le type de document (DT), l'année de publication (PY) et le titre (TI), présentent un taux de complétude de 100 %. Cela garantit une base solide pour les analyses chronologiques et thématiques globales.
- Données de Réseaux (Statut Good à Acceptable) : Les informations relatives aux auteurs (AU), aux affiliations (C1) et aux mots-clés (DE) affichent des taux de perte modérés (entre 4,99 % et 19,01 %). Ces données restent exploitables pour générer des réseaux de co-auteurs ou de co-occurrences, bien qu'une légère marge d'erreur doive être prise en compte.
- Points de Vigilance et Lacunes Critiques :

Les champs ID (Keywords Plus) et SO (Journal) sont considérés comme "pauvres" avec plus de 21 % de données manquantes, ce qui pourrait limiter l'analyse de la structure intellectuelle via les revues.

Plus critique encore, les références citées (CR) et les catégories scientifiques (WC) sont totalement absentes (100 % de données manquantes). Cela signifie que toute analyse de co-citation ou de couplage bibliographique sera impossible avec ce jeu de données spécifique.

Metadata	Description	Missing Counts	Missing %	Status
AB	Abstract	0	0.00	Excellent
DT	Document Type	0	0.00	Excellent
LA	Language	0	0.00	Excellent
PY	Publication Year	0	0.00	Excellent
TI	Title	0	0.00	Excellent
TC	Total Citation	0	0.00	Excellent
AU	Author	625	4.99	Good
C1	Affiliation	718	5.73	Good
DI	DOI	1051	8.39	Good
DE	Keywords	2380	19.01	Acceptable
ID	Keywords Plus	2657	21.22	Poor
SO	Journal	4464	35.65	Poor
RP	Corresponding Author	5105	40.77	Poor
CR	Cited References	12522	100.00	Completely missing
WC	Science Categories	12522	100.00	Completely missing

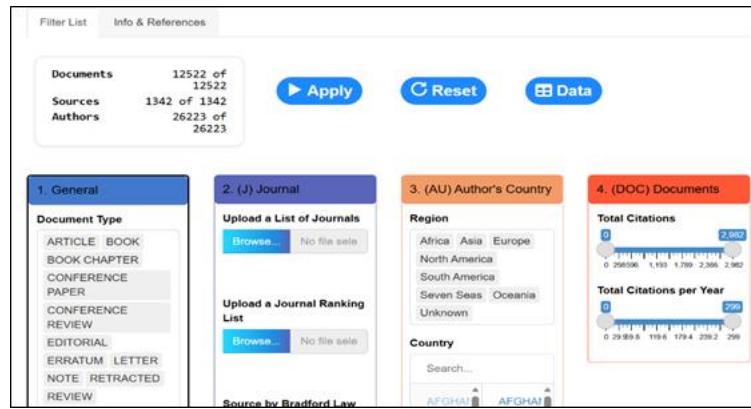
**Figure 21 : Diagnostic de la base de données : Taux de perte et fiabilité des champs bibliographique**

### 3.3.1.4 Filtrage de BiblioShiny

L'interface de filtrage au sein de BiblioShiny constitue un levier stratégique pour le chercheur, permettant un affinement précis du corpus avant toute phase de modélisation. Ce module de contrôle centralise la gestion des métadonnées et permet une segmentation rigoureuse des données sources.

Voici les fonctionnalités principales de cette étape de prétraitement :

- Pilotage en temps réel : Un tableau de bord dynamique permet de suivre instantanément l'évolution des statistiques clés, telles que le nombre total de documents, de sources et d'auteurs, facilitant ainsi la prise de décision lors de l'application des filtres.
- Segmentation thématique et typologique : Le système offre la possibilité d'isoler les données selon des colonnes thématiques précises, notamment par type de document (articles, revues, conférences) ou par origine géographique des auteurs.
- Analyse de la pertinence scientifique : L'outil intègre des filtres basés sur l'impact, permettant de sélectionner les travaux selon leur nombre de citations ou d'appliquer des théories bibliométriques classiques, comme la loi de Bradford, pour identifier les revues cœurs d'un domaine.
- Validation des commandes : Des fonctions de contrôle permettent d'appliquer les sélections, de réinitialiser les paramètres ou d'accéder directement aux données brutes pour vérifier l'intégrité du sous-ensemble créé.



**Figure 22 : Interface de Filtrage BiblioShiny**

Cette phase de filtrage assure que l'analyse ultérieure repose sur un jeu de données cohérent, éliminant les bruits documentaires qui pourraient fausser les résultats de la cartographie.

### 3.3.2 Réalisation de la bibliométrie via l'outil BiblioShiny

#### 3.3.2.1 Métriques Bibliométriques Principales

L'analyse descriptive des informations principales constitue le socle de toute étude bibliométrique rigoureuse, permettant de dresser un portrait robot du corpus avant toute manipulation complexe. Cette étape de synthèse, réalisée via l'interface BiblioShiny, offre une vision macroscopique indispensable pour valider la pertinence et la représentativité du jeu de données.

Voici les dimensions stratégiques couvertes par ce résumé statistique :

- Étendue Temporelle et Dynamique de Croissance : Le système identifie la période couverte (par exemple, 2015-2025) et calcule le taux de croissance annuel de la production scientifique, permettant de mesurer l'attractivité et l'actualité du domaine de recherche.
- Volume de Production et Diversité des Sources : Le décompte précis des documents (ex: 12 522 articles) et des sources (ex: 1 342 revues) permet d'évaluer l'ampleur de la littérature disponible et le degré de dispersion des connaissances.
- Structure de la Collaboration Scientifique : L'outil extrait des indicateurs sur les pratiques de co-publication, comme le nombre moyen de co-auteurs par document, révélant si la discipline repose sur des travaux individuels ou sur de vastes réseaux de collaboration internationale.
- Impact et Visibilité : Les mesures de citations moyennes par document et par année offrent un premier aperçu de l'impact scientifique global du corpus analysé.



**Figure 23 : Tableau de Bord des Métriques Bibliométriques Principales**

### 3.3.2.2 Évolution de la Production Scientifique Annuelle sur la 4G, 5G et l'IoT

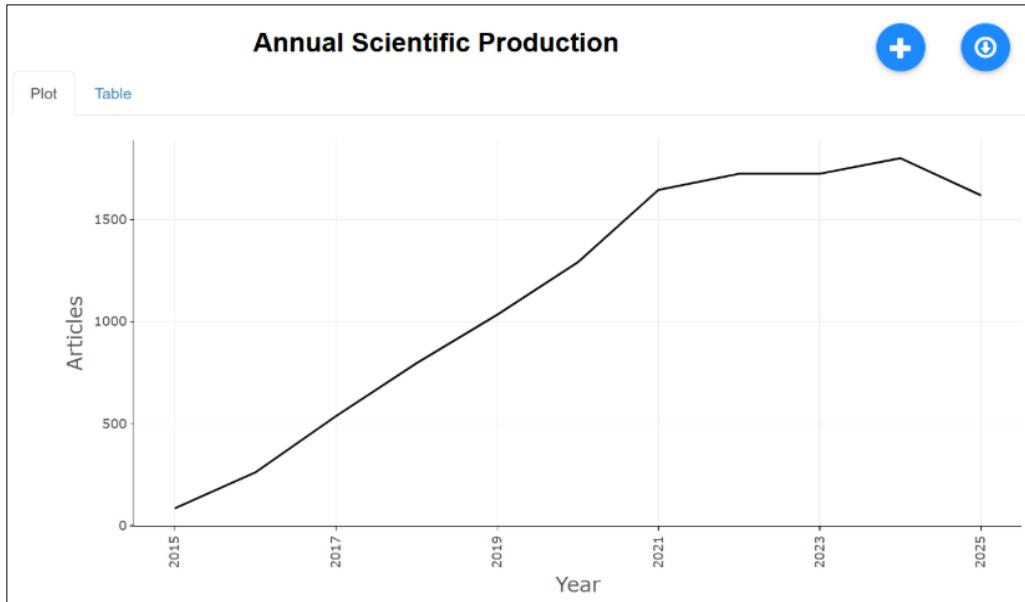
L'analyse de la dynamique temporelle de la production scientifique est un indicateur fondamental pour évaluer la vitalité et l'attractivité d'un champ de recherche. Cette étude chronologique permet de transformer des données de publication en une courbe de croissance intelligible, révélant les phases d'émergence, de consolidation ou d'explosion d'une thématique au sein de la communauté académique.

Voici les aspects clés que révèle cette analyse de l'évolution annuelle :

- Tendance de croissance : Le suivi du volume de publications permet d'identifier si le domaine suit une progression linéaire ou exponentielle, confirmant souvent un taux de croissance annuel moyen élevé.
- Expansion du corpus : La trajectoire ascendante met en évidence le passage d'une production de niche à une production de masse, où le nombre de contributions annuelles peut tripler sur une décennie.
- Actualité du domaine : La concentration des pics de publication vers les années les plus récentes souligne un intérêt académique soutenu et une accélération de la recherche mondiale sur la période étudiée.
- Validation statistique : Cette visualisation graphique sert de preuve empirique aux indicateurs de synthèse, illustrant concrètement comment le corpus s'étoffe pour atteindre des milliers de documents disponibles.

Cette vision d'ensemble de la trajectoire scientifique prépare l'analyse plus fine des sources et des auteurs les plus influents qui portent cette dynamique de croissance.

Cette figure illustre l'évolution de la production scientifique annuelle entre 2015 et 2025, mettant en lumière une croissance remarquable et constante de la recherche dans ce domaine. Le graphique montre une progression rapide du nombre d'articles, qui passe de moins de 500 en 2015 à un sommet dépassant les 1 500 publications annuelles vers 2024, confirmant ainsi le taux de croissance annuel élevé de 34,27 % observé dans les statistiques générales. Cette trajectoire ascendante témoigne d'un intérêt académique soutenu et d'une expansion significative du corpus documentaire sur la période étudiée.



**Figure 24 : Évolution de la Production Scientifique Annuelle sur la 4G, 5G et l'IoT**

### 3.3.2.3 citation moyenne par an

L'analyse de l'impact scientifique moyen au fil du temps permet de mesurer la réception et la reconnaissance académique d'un domaine de recherche. Contrairement à la simple mesure du volume de production, cette métrique évalue la qualité perçue et l'influence réelle des publications à travers le prisme des citations.

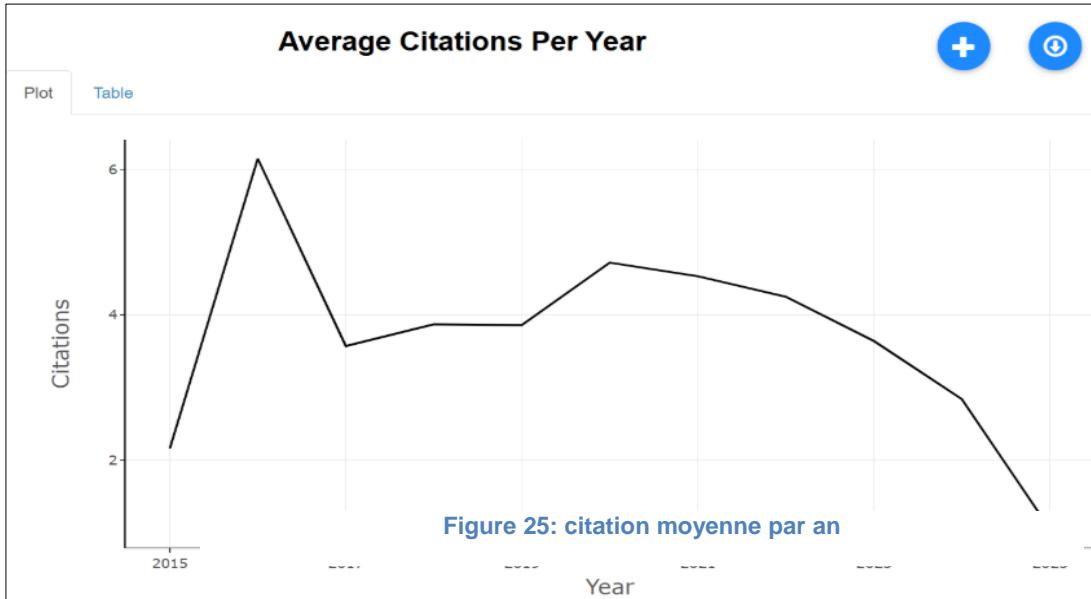
Cette approche temporelle de l'impact révèle plusieurs dynamiques caractéristiques du cycle de vie des idées scientifiques :

- Identification des années charnières : L'analyse permet de repérer les périodes de forte influence, souvent marquées par des pics de citations qui signalent la parution de travaux fondateurs ou de découvertes majeures dans le corpus.
- Stabilité et maturation du domaine : Une phase de stabilisation des citations moyennes indique généralement une thématique qui a atteint sa maturité, où les publications bénéficient d'une attention régulière et constante de la part de la communauté scientifique.
- Biais de récence et latence des citations : Un déclin observé sur les années les plus récentes ne traduit pas nécessairement une baisse de qualité, mais reflète le "temps de latence" nécessaire pour que de nouveaux articles soient lus, cités et indexés.
- Complémentarité des indicateurs : En croisant l'impact moyen avec le taux de croissance annuel (estimé ici à 34,27 %), le chercheur peut distinguer les périodes où la quantité de recherche prime sur l'influence, et inversement.

Cette perspective globale sur la reconnaissance des travaux est essentielle pour comprendre comment le savoir se propage et se stabilise avant d'analyser la structure plus complexe des réseaux de citations.

Cette figure illustre l'évolution de l'impact scientifique moyen par année entre 2015 et 2025, révélant une tendance fluctuante qui culmine avec un pic de plus de 6 citations par article en 2016 avant de se stabiliser. Après une phase de relative stabilité entre 2017 et 2021, on observe un déclin progressif du nombre moyen de citations pour atteindre son point le plus bas en 2025, un phénomène souvent lié au manque de recul temporel pour les publications les plus récentes. Cette métrique complète les données

de production en offrant un aperçu de la réception et de la reconnaissance académique des travaux au fil du temps.



### 3.3.2.4 Most relevant sources

L'identification des sources les plus pertinentes constitue une étape charnière pour comprendre l'architecture éditoriale d'un domaine de recherche. Cette analyse permet de cartographier les vecteurs de diffusion privilégiés par la communauté scientifique, révélant ainsi les revues et conférences qui agissent comme les principaux pôles de concentration du savoir.

Voici les enjeux majeurs de cette hiérarchisation des sources :

Détection de la concentration éditoriale : L'analyse met souvent en lumière une distribution inégale où une seule source peut concentrer une part massive de la production (par exemple, 4 464 documents sur un total de 12 522), structurant ainsi le paysage bibliographique.

Identification des pôles d'excellence : Les titres majeurs, tels que les revues de l'IEEE spécialisées dans l'Internet des objets ou les systèmes électroniques, ressortent comme des références incontournables pour les chercheurs.

Analyse de la spécialisation thématique : Le classement des sources par volume de publications permet de confirmer l'ancrage disciplinaire du corpus, souvent centré sur l'ingénierie, les technologies de capteurs et les infrastructures de réseau.

Validation de la portée scientifique : En croisant le nombre de sources (1 342) avec leur volume respectif, le chercheur peut évaluer si la recherche est dispersée ou, au contraire, consolidée au sein de vecteurs de haute visibilité.

Cette vision des acteurs de la publication offre une base solide pour comprendre comment l'information circule avant d'explorer plus précisément les auteurs qui portent ces travaux.

Cette figure présente les sources les plus pertinentes du corpus, classant les revues et conférences par leur volume de publications. Le graphique est largement dominé par une source principale totalisant 4 464 documents, suivie par des titres majeurs du domaine de l'ingénierie et de la technologie tels que l'IEEE Internet of Things Journal (432) et IEEE Access (407). Cette distribution met en évidence une concentration de la recherche au sein de vecteurs de diffusion spécialisés, notamment dans les réseaux, les capteurs et les systèmes électroniques.

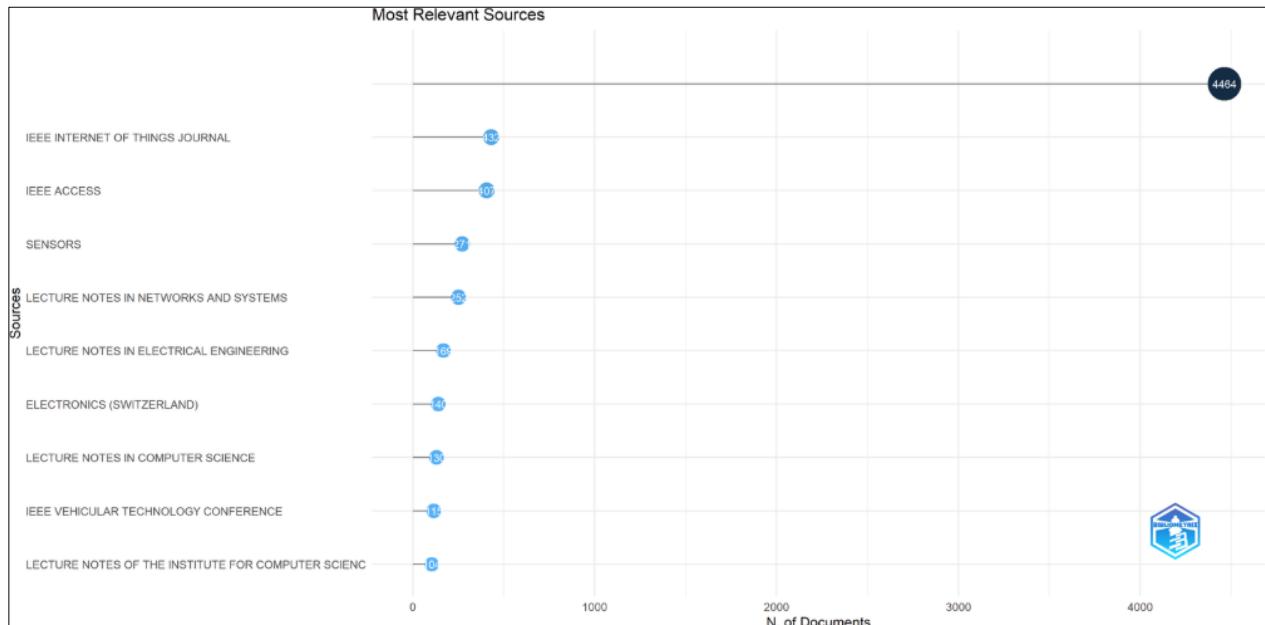


Figure 26: Most relevant sources

### 3.3.2.5 Core sources by Bradford's law

L'application de la loi de Bradford constitue une méthode fondamentale en bibliométrie pour identifier la structure d'un domaine de recherche à travers la distribution de ses publications. Cette théorie postule qu'un petit noyau de revues spécialisées concentre la majeure partie des articles pertinents sur un sujet donné, tandis qu'une multitude d'autres sources n'y contribuent que de manière sporadique.

Cette analyse de productivité permet de segmenter le paysage éditorial selon plusieurs axes stratégiques :

- Identification du Noyau Central (Core Sources) : La méthode permet d'isoler les revues "cœurs" qui constituent les vecteurs de diffusion essentiels et les plus productifs du domaine.
- Détection de la Concentration Scientifique : L'analyse révèle souvent une disparité extrême où un nombre très restreint de sources peut générer des milliers d'articles, marquant une forte spécialisation thématique.
- Hiérarchisation par Rangs : En classant les sources par ordre décroissant de productivité sur une échelle logarithmique, il devient possible de visualiser la transition entre les pôles d'excellence et les sources dites périphériques.

- Optimisation de la Veille Scientifique : Pour le chercheur, cette segmentation facilite la sélection des revues prioritaires pour la consultation ou la soumission de futurs travaux, en s'appuyant sur la densité documentaire observée dans le corpus.

Cette vision hiérarchisée des sources permet de valider la cohérence du jeu de données en démontrant que la recherche s'organise autour de piliers éditoriaux solides avant d'aborder l'analyse détaillée des mots-clés et des thématiques émergentes.

Cette figure illustre l'application de la loi de Bradford pour identifier les sources fondamentales du corpus, classant les revues par ordre décroissant de productivité en fonction de leur rang logarithmique. Le graphique met en évidence une zone de "sources cœurs" (Core Sources) très concentrée, où un petit nombre de revues génère une part massive de la production totale (avec un pic dépassant les 4 000 articles), suivie d'une longue traîne de sources moins productives. Cette analyse permet de distinguer les vecteurs de publication essentiels des sources périphériques, confirmant ainsi une forte spécialisation de la littérature au sein de quelques revues majeures du domaine.

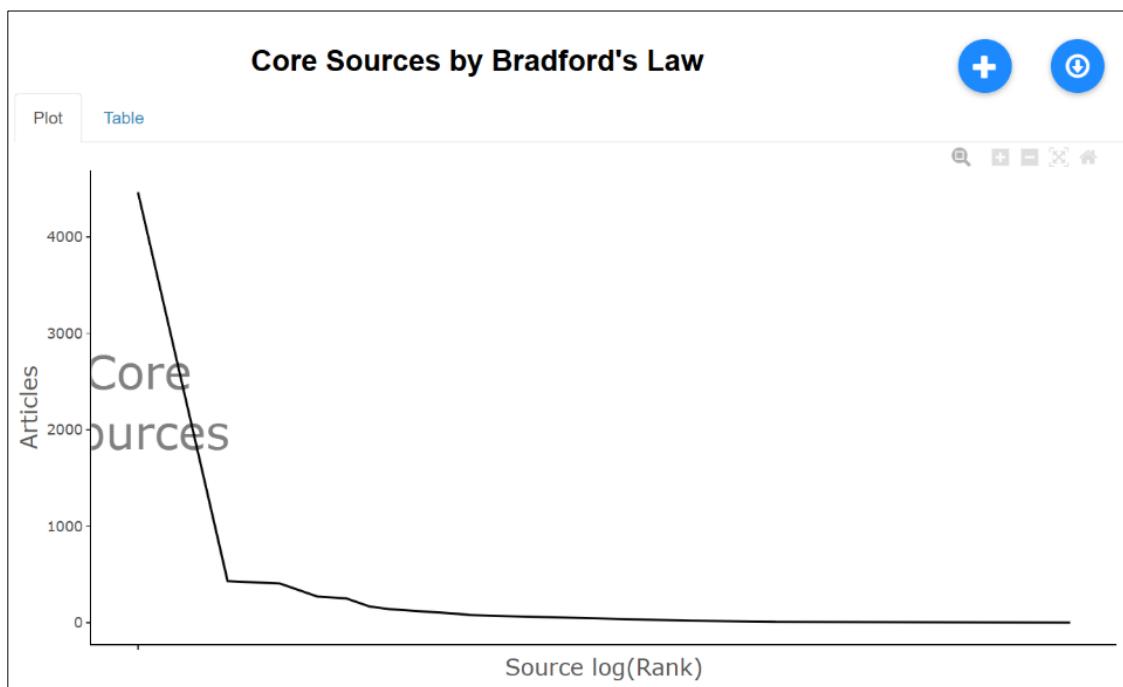


Figure 27: Core sources by Bradford's law

### 3.3.2.6 Sources Production over Time

L'analyse de la production scientifique cumulative par source permet de visualiser la dynamique de croissance et la pérennité des principaux vecteurs de diffusion au sein d'un domaine de recherche. Contrairement à une vision annuelle isolée, cette approche met en lumière la capacité des revues à capter et à retenir l'attention de la communauté scientifique sur le long terme.

Voici les enseignements majeurs que l'on peut tirer de l'observation de ces trajectoires :

- Accélération des cycles de publication : On observe fréquemment une rupture de pente ou une accélération marquée à partir d'une période charnière (par exemple vers 2019), signalant une explosion de l'intérêt académique et une multiplication des soumissions acceptées.

- Compétition entre titres majeurs : Le suivi cumulatif révèle souvent une rivalité entre les revues de référence, comme celles éditées par l'IEEE, qui se disputent la dominance en termes de volume de publications sur des thématiques telles que l'Internet des objets ou les infrastructures réseaux.
- Confirmation des leaders du marché : Les sources qui franchissent des seuils symboliques (dépassant les centaines de publications cumulées) s'imposent comme les piliers structurels du corpus, à l'instar des revues spécialisées en capteurs et des séries de conférences technologiques.
- Vitalité thématique : La trajectoire ascendante de ces courbes reflète directement l'expansion rapide des technologies numériques et des systèmes électroniques durant la dernière décennie.

Cette figure illustre l'évolution de la production cumulative des principales revues du corpus entre 2015 et 2025, mettant en évidence une accélération marquée de la croissance à partir de 2019. On observe une compétition serrée pour la dominance entre l'IEEE Internet of Things Journal et IEEE Access, qui finissent par dépasser les 400 publications cumulées, suivis par des titres comme Sensors et les collections Lecture Notes. Cette trajectoire ascendante commune souligne non seulement la vitalité de ces sources, mais aussi l'expansion continue et rapide des thématiques liées à l'Internet des objets et aux systèmes électroniques durant la dernière décennie.

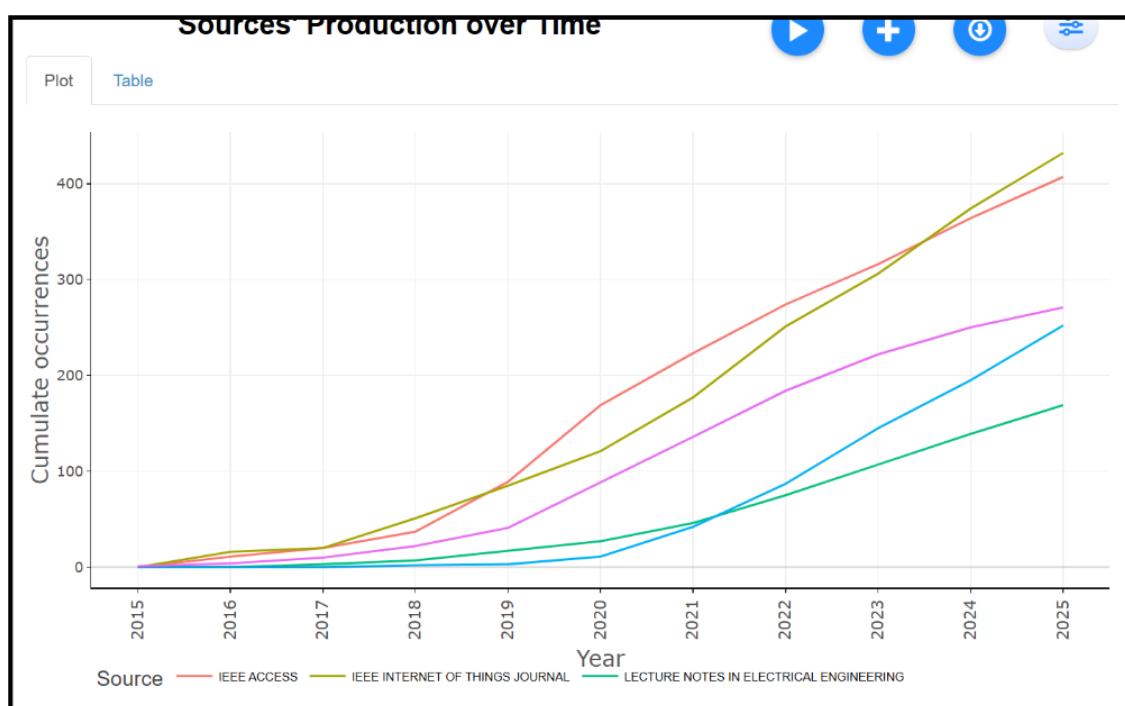


Figure 28: Sources Production over Time

### 3.3.2.7 Most relevant authors

L'identification des auteurs les plus productifs constitue une étape fondamentale pour comprendre la structure humaine et intellectuelle d'un domaine scientifique. Cette analyse permet de repérer les chercheurs dont l'activité soutenue et le volume de publications façonnent les tendances actuelles et influencent la dynamique globale du réseau.

Cette cartographie de l'expertise met en lumière plusieurs caractéristiques de la production savante

- Identification d'un noyau prolifique : L'analyse révèle souvent l'existence d'un groupe restreint de chercheurs qui portent une part significative de la littérature, avec des volumes dépassant parfois la centaine de publications par auteur.
- Emergence de pôles d'influence : La forte présence de patronymes spécifiques souligne souvent la domination de certains centres de recherche ou zones géographiques, témoignant de l'investissement massif de certaines régions du globe dans les domaines de pointe.
- Concentration de l'expertise : En observant des contributeurs comme WANG Y, ZHANG Y ou WANG X, on identifie les figures centrales dont les travaux servent de socle aux développements technologiques du corpus.
- Dynamique de collaboration : Ce classement, bien qu'individuel, reflète indirectement la puissance des laboratoires et des réseaux de co-auteurs qui permettent d'atteindre de tels niveaux de productivité scientifique.

Cette figure identifie les auteurs les plus productifs du corpus en les classant par nombre de publications, révélant une forte contribution de chercheurs aux patronymes d'origine asiatique. Le classement est dominé par WANG Y et ZHANG Y avec 106 documents chacun, suivis de près par WANG X (105) et ZHANG J (104), illustrant une concentration importante de l'expertise scientifique chez un noyau d'auteurs prolifiques. Cette répartition souligne l'influence majeure de ces contributeurs sur la dynamique de recherche globale du domaine étudié.

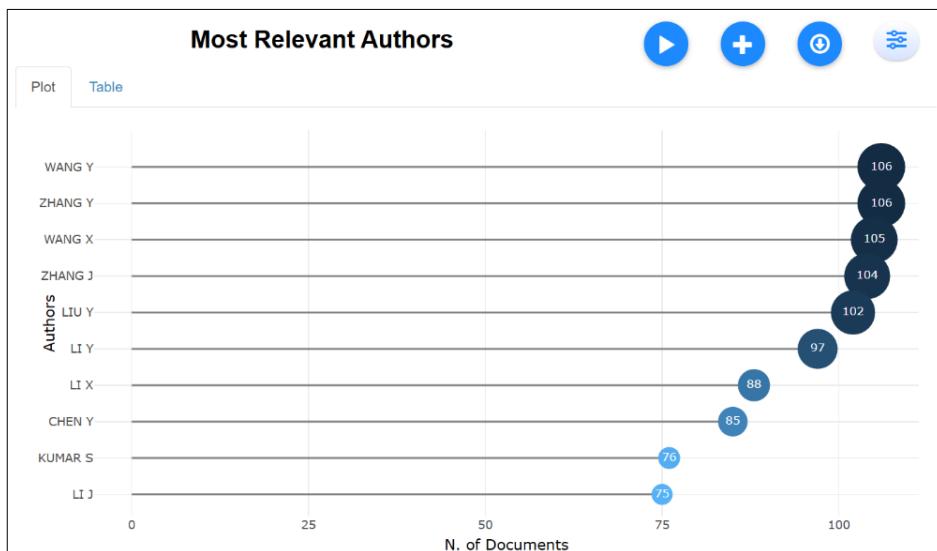


Figure 29 : Most relevant authors

### 3.3.2.8 Authors production over time

L'analyse de la production des auteurs au fil du temps permet de dépasser la simple mesure du volume global pour explorer la régularité et l'impact temporel des contributions individuelles. Cette approche chronologique offre une vue dynamique sur les trajectoires de recherche, révélant la pérennité de l'engagement des scientifiques au sein de leur discipline.

Voici les dimensions analytiques couvertes par cette perspective temporelle :

- Régularité et continuité de la recherche : La visualisation permet de distinguer les chercheurs qui maintiennent une activité soutenue sur une décennie (ex : 2015-2025) de ceux dont les contributions sont plus ponctuelles, soulignant ainsi les piliers du domaine.
- Intensité de la production annuelle : La taille des marqueurs visuels sert d'indicateur pour quantifier le dynamisme annuel de chaque auteur, facilitant l'identification des périodes de productivité intense.
- Qualité et réception académique : En intégrant une dimension colorimétrique pour les citations, le système permet de corrélérer la quantité de publications avec leur impact réel, mettant en lumière les années où les travaux ont été les plus influents pour la communauté.
- Détection des pics de carrière : L'outil aide à repérer des moments charnières pour certains contributeurs, comme des augmentations significatives d'impact autour d'années spécifiques (par exemple 2021), signalant souvent la parution de travaux majeurs.

Cette cartographie temporelle est essentielle pour comprendre comment l'expertise se construit et se maintient dans le temps avant d'analyser les relations de co-auteurat qui structurent le réseau social de la discipline.

Cette figure illustre la production des auteurs les plus prolifiques au fil du temps entre 2015 et 2025, où la taille des cercles représente le nombre annuel de publications et l'intensité de la couleur reflète le volume de citations reçues. On observe une activité soutenue et régulière pour des chercheurs comme WANG Y et ZHANG J sur toute la période, tandis que d'autres, tels que CHEN Y, présentent des pics d'impact plus marqués, notamment autour de l'année 2021. Cette visualisation permet de suivre la trajectoire de carrière des contributeurs clés et d'identifier les périodes de forte influence scientifique au sein de la communauté de recherche.

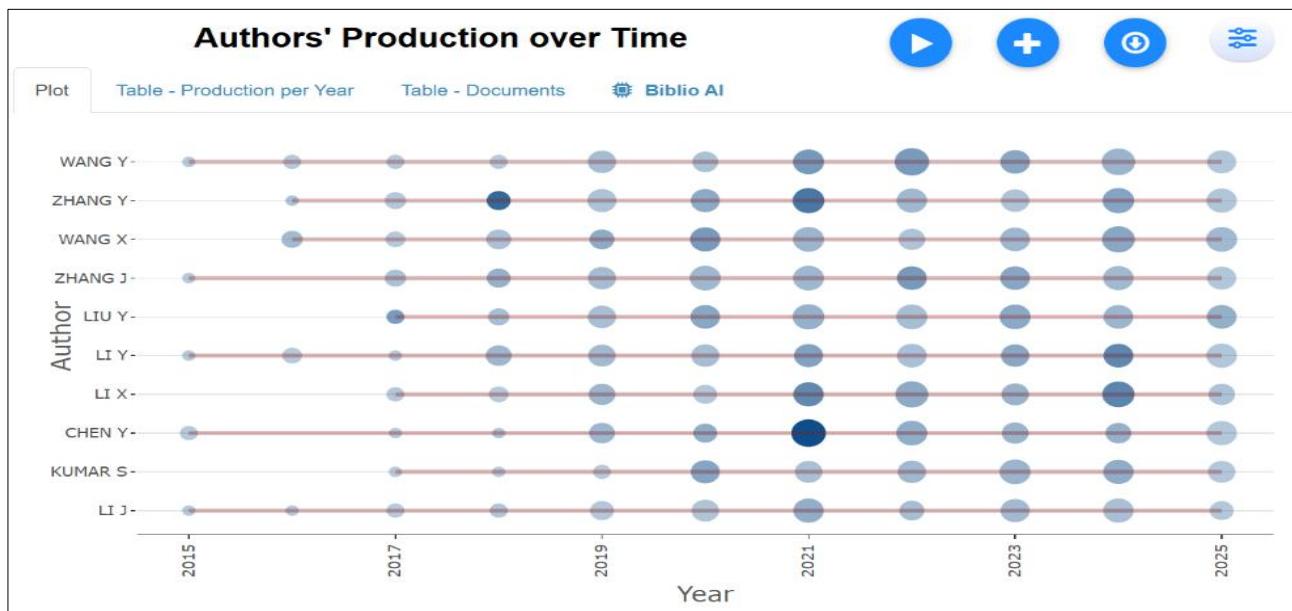


Figure 30: Authors production over time

### 3.3.2.9 Most Relevant Affiliations

L'analyse des institutions les plus influentes permet de localiser géographiquement et académiquement les pôles d'excellence qui soutiennent le développement d'un domaine de recherche. Cette dimension

institutionnelle de la biométrie est essentielle pour identifier les stratégies nationales d'investissement scientifique et la capacité de certains établissements à dominer la production mondiale.

Voici les enjeux majeurs révélés par la cartographie des affiliations :

- Détection des leaders académiques : Le classement met en lumière les universités qui agissent comme des moteurs de production, avec des volumes de publications dépassant parfois la centaine d'articles par établissement.
- Géographie de l'innovation : L'analyse révèle souvent une concentration massive de l'expertise dans des zones spécifiques, notamment en Asie, où les universités technologiques de pointe occupent les premières places du classement mondial.
- Spécialisation institutionnelle : Les établissements arrivant en tête, tels que les universités de postes, de télécommunications ou d'électronique, confirment l'orientation technique et infrastructurelle du corpus analysé.
- Emergence de pôles internationaux : Au-delà des leaders historiques, l'outil identifie des institutions majeures au Moyen-Orient ou en Inde, témoignant d'une mondialisation de la recherche et d'une compétition accrue entre les régions émergentes.

Cette vision globale des forces institutionnelles en présence permet de mieux comprendre l'origine des financements et des collaborations qui seront ensuite analysés à travers les réseaux de co-publications.

Cette figure répertorie les institutions les plus influentes en fonction de leur volume de publications, soulignant une domination marquée des établissements académiques asiatiques dans ce domaine de recherche. La Beijing University of Posts and Telecommunications arrive largement en tête avec 136 articles, suivie par l'University of Electronic Science and Technology of China (84) et Xidian University (83). Ce classement met en évidence le rôle central des universités technologiques chinoises, tout en notant la présence d'autres pôles importants comme la King Saud University ou le Vellore Institute of Technology, reflétant ainsi une forte concentration de l'expertise scientifique dans les régions émergentes.

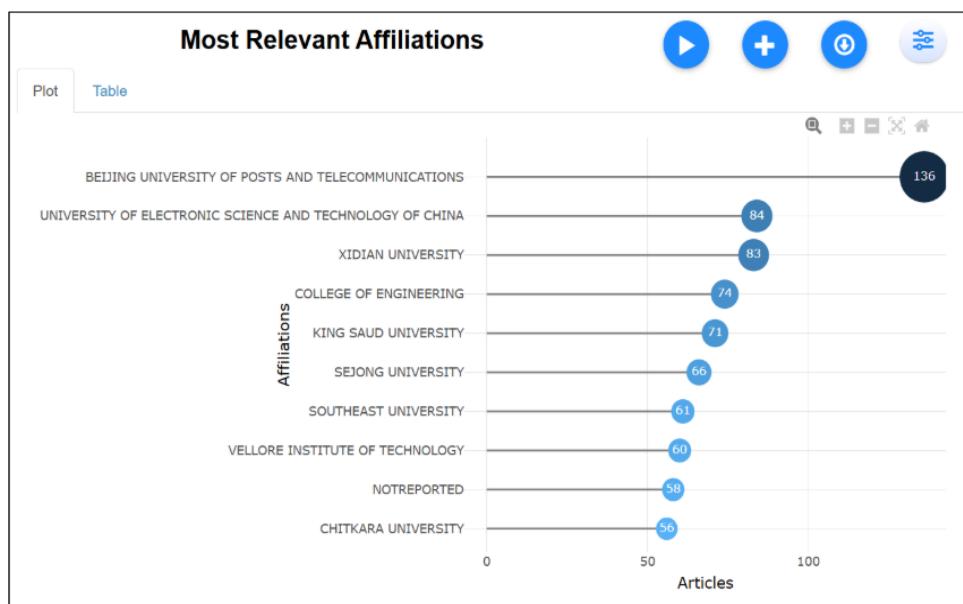


Figure 31 : Most Relevant Affiliations

### **3.3.2.10 Corresponding Author's Countries**

L'analyse de la répartition géographique et de la collaboration internationale permet de cartographier les puissances scientifiques dominantes au sein d'un domaine de recherche. Cette dimension spatiale de la bibliométrie est essentielle pour comprendre comment la production de connaissances s'articule entre les dynamiques nationales et les réseaux de coopération mondiale.

Voici les principaux indicateurs révélés par cette approche géographique :

- Identification des leaders mondiaux : Le volume de publications par pays permet de distinguer les nations qui agissent comme les moteurs principaux de la recherche, avec des contributions massives dépassant souvent le millier de documents pour les pays en tête de classement.
- Structure de la coopération (SCP vs MCP) : L'analyse différencie les publications issues d'une seule nation (Single Country Publication) de celles impliquant des co-auteurs de plusieurs pays (Multiple Country Publication), offrant ainsi une mesure précise du degré d'ouverture internationale de chaque système de recherche.
- Domination des pays émergents : On observe fréquemment une forte concentration de l'activité scientifique dans les puissances technologiques d'Asie, confirmant leur rôle central dans l'innovation et la production documentaire à l'échelle globale.
- Stratégies de rayonnement : La proportion de collaborations internationales (MCP) permet d'évaluer la capacité d'influence d'un pays et son intégration dans les réseaux de recherche globaux, au-delà de sa seule production domestique.

Cette figure illustre la répartition géographique des pays des auteurs correspondants, mettant en lumière la domination de la Chine et de l'Inde avec respectivement plus de 1 800 et 1 400 documents. Le graphique distingue également les types de collaboration : la Single Country Publication (SCP), représentée en bleu, prédomine largement dans les pays de tête, tandis que la Multiple Country Publication (MCP), en rouge, souligne une part significative de recherche internationale, particulièrement visible pour la Chine. Cette visualisation permet d'identifier les pôles de recherche mondiaux les plus actifs et leur degré d'ouverture à la coopération scientifique internationale.

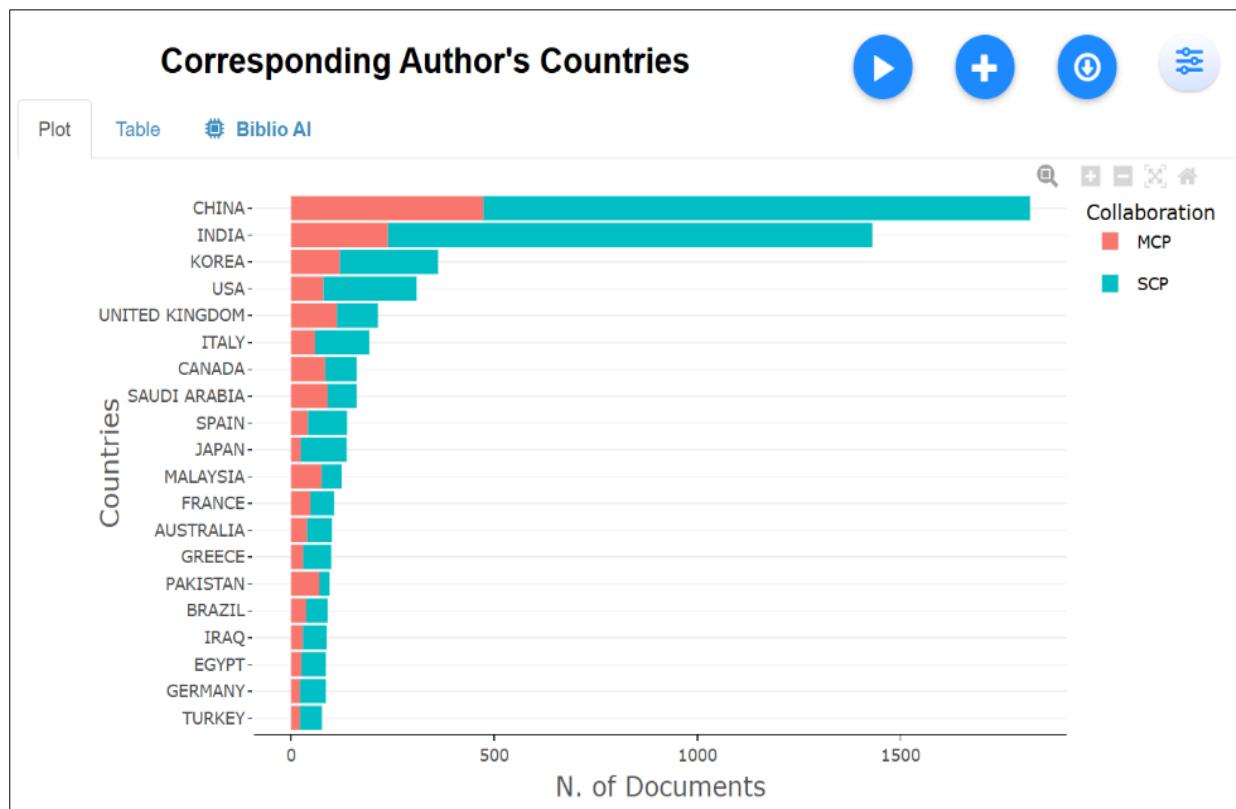


Figure 32: Corresponding Author's Countries

### 3.3.2.11 Most Cited Countries

L'analyse du nombre total de citations par pays permet de mesurer l'autorité et l'influence réelle des nations au sein de la communauté scientifique mondiale. Contrairement aux indicateurs de volume, cette métrique de performance bibliométrique évalue la qualité perçue et l'utilité des travaux produits, transformant la visibilité géographique en une mesure d'impact intellectuel.

Cette cartographie de la reconnaissance internationale met en lumière plusieurs dynamiques de pouvoir :

- Identification des pôles d'influence majeure : Le classement révèle les nations dont les travaux servent de référence incontournable, avec des volumes de citations pouvant atteindre des dizaines de milliers pour les leaders du domaine.
- Domination des puissances technologiques : On observe une corrélation forte entre l'investissement massif dans les technologies de pointe et la reconnaissance académique, propulsant les pays d'Asie aux premières places mondiales.
- Mesure de l'impact vs productivité : Cette analyse permet de confirmer si la quantité de documents publiés (comme les 12 522 recensés dans le corpus) se traduit effectivement par une influence proportionnelle sur les recherches ultérieures.
- Hiérarchie de la science globale : La comparaison entre les puissances émergentes et les nations traditionnellement dominantes (comme les USA ou le Royaume-Uni) offre un aperçu du basculement des centres de gravité de la connaissance scientifique mondiale.

Cette figure illustre le classement des pays les plus cités au sein du corpus, confirmant une nouvelle fois la prédominance de la Chine qui écrase la concurrence avec un total impressionnant de 39 405 citations. Elle est suivie par l'Inde (16 660) et la Corée (14 166), tandis que des pays comme les USA et le Royaume-Uni se situent autour de la barre des 10 000 citations. Cette répartition souligne que la

domination asiatique dans ce domaine ne se limite pas seulement au volume de production, mais s'étend également à l'impact et à la reconnaissance scientifique mondiale de ses travaux.

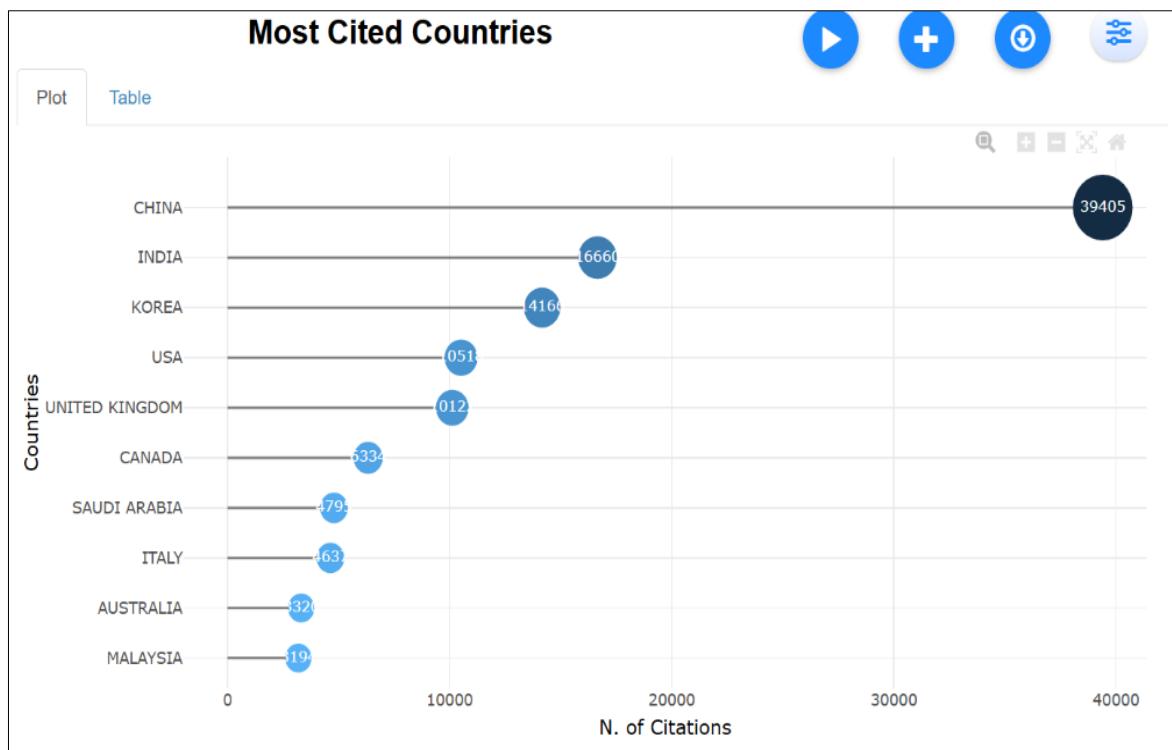


Figure 33 : Most Cited Countries

### 3.3.2.12 Countries' Scientific Production

La cartographie géospatiale de la production scientifique constitue l'un des outils de visualisation les plus puissants pour appréhender la dimension internationale d'un champ de recherche. Elle permet de transformer des données tabulaires en une représentation spatiale immédiate, révélant les disparités régionales et les épicentres de l'innovation à l'échelle de la planète.

Cette approche géographique globale met en exergue plusieurs caractéristiques structurelles du domaine :

- Visualisation de l'intensité académique : L'utilisation de dégradés de couleurs permet d'identifier instantanément les nations dont l'effort de recherche est le plus soutenu, facilitant la distinction entre les leaders mondiaux et les contributeurs émergents.
- Identification des pôles de puissance : La carte met souvent en évidence une concentration massive de l'activité dans des zones stratégiques, comme l'Asie, où le volume de documents produits témoigne d'une volonté politique et technologique de dominer le secteur.
- Analyse de la diffusion mondiale : En observant la couverture des différents continents, le chercheur peut évaluer si la thématique est restreinte à quelques pays industrialisés ou si elle fait l'objet d'un intérêt global, incluant les pays en développement.
- Validation des tendances de production : Cette représentation spatiale sert de confirmation visuelle aux statistiques de volume (comme les 12 522 documents identifiés), en montrant

comment cette masse documentaire est physiquement distribuée à travers les réseaux universitaires mondiaux.

Cette carte mondiale de la production scientifique (Countries' Scientific Production) illustre la répartition géographique des publications du corpus, utilisant des nuances de bleu pour indiquer l'intensité de l'activité par pays. La domination de l'Asie est visuellement frappante, avec la Chine et l'Inde apparaissant en bleu foncé, ce qui confirme leur position de leaders mondiaux en volume de documents produits. D'autres pôles majeurs comme l'Amérique du Nord (USA) et l'Europe de l'Ouest présentent une activité soutenue, tandis que la présence de teintes plus claires sur tous les continents souligne le caractère global et l'intérêt international croissant pour cette thématique de recherche.

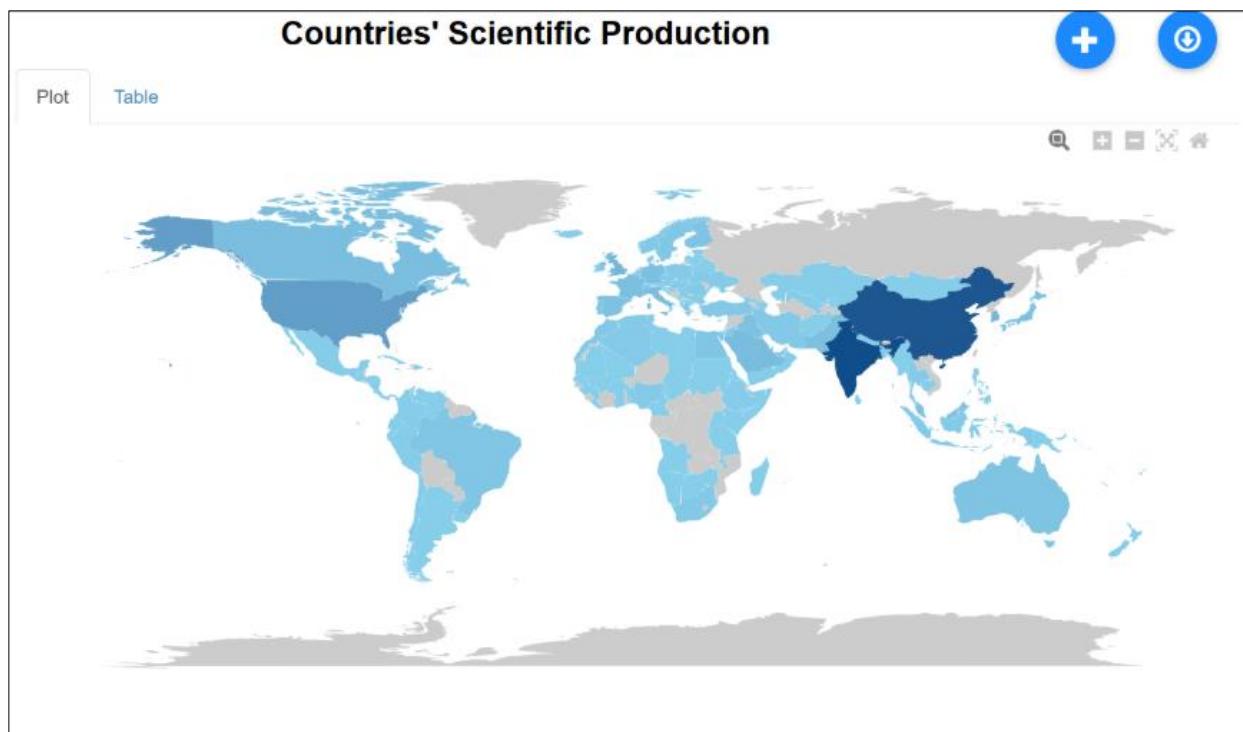


Figure 34: Countries' Scientific Production

### 3.3.2.13 Countries' Collaboration World Map

L'analyse des réseaux de collaboration internationale permet de dépasser la simple mesure de la production nationale pour explorer la structure relationnelle de la science mondiale. En bibliométrie, cette approche cartographique révèle comment les connaissances circulent au-delà des frontières et identifie les alliances stratégiques qui soutiennent l'innovation technologique à l'échelle planétaire.

Voici les dynamiques clés mises en lumière par la visualisation des flux de co-publications :

Interconnectivité des pôles de recherche : La présence de liens entre les continents démontre que la recherche moderne ne s'effectue pas en vase clos, mais repose sur un échange constant de données et d'expertise entre les centres d'excellence.

Identification des axes préférentiels : La fréquence des collaborations, souvent marquée par la densité des connexions, permet de repérer les corridors de recherche privilégiés, notamment entre les puissances technologiques d'Amérique du Nord, d'Europe et d'Asie.

Transfert de connaissances et mondialisation : L'étendue du réseau souligne le caractère global des thématiques étudiées, montrant que même les pays ayant une production domestique plus modeste sont intégrés dans les flux de savoir internationaux.

Complémentarité des capacités : Ces réseaux de collaboration compensent souvent les disparités de ressources entre les pays, permettant une mutualisation des infrastructures et des talents autour de projets communs.

Cette figure présente la carte mondiale des collaborations entre pays (Countries' Collaboration World Map), illustrant l'intensité des réseaux de recherche internationaux à travers le globe. Les lignes rouges relient les pays partenaires, dont l'épaisseur reflète la fréquence des co-publications, mettant en évidence un réseau extrêmement dense entre l'Amérique du Nord (USA), l'Europe et l'Asie (Chine et Inde). Cette visualisation cartographique souligne que, bien que la production soit concentrée dans certains pôles majeurs colorés en bleu foncé, la recherche dans ce domaine est profondément interconnectée à l'échelle mondiale, facilitant ainsi le transfert de connaissances entre les différents continents.



**Figure 35: Countries' Collaboration World Map**

### 3.3.2.14 World cloud

L'analyse des nuages de mots (WordClouds) constitue une étape fondamentale de la textométrie pour identifier visuellement les concepts dominants et la structure thématique d'un domaine de recherche. Cette représentation graphique transforme la fréquence brute des termes en une hiérarchie visuelle, permettant de saisir instantanément les préoccupations majeures et les orientations technologiques d'un corpus volumineux.

Cette approche sémantique permet de mettre en lumière plusieurs dimensions du champ d'étude :

- Identification des concepts hégémoniques : La taille des caractères permet de distinguer immédiatement les termes centraux, qui agissent comme les piliers théoriques et techniques du domaine.
- Cartographie des technologies émergentes : Le nuage révèle la convergence entre les infrastructures de base et les innovations récentes, telles que les nouvelles générations de réseaux mobiles ou les méthodes d'intelligence artificielle.
- Détection des enjeux transversaux : Au-delà des technologies, l'analyse fait ressortir des thématiques critiques comme la protection des données ou l'optimisation des ressources énergétiques, essentielles à la viabilité des systèmes complexes.
- Synthèse de la diversité sémantique : La disposition des termes satellites illustre la richesse du domaine, montrant comment une thématique centrale s'articule avec des applications spécialisées en télécommunications et en apprentissage automatique.

Ce nuage de mots (WordCloud) illustre la prédominance thématique des mots-clés au sein du corpus, où la taille de chaque terme est proportionnelle à sa fréquence d'apparition dans les publications. Le concept d'Internet of Things (Internet des objets) occupe une place centrale et hégémonique, entouré de piliers technologiques majeurs tels que la 5G, l'IoT, et la network security (sécurité réseau). D'autres termes satellites comme energy efficiency, machine learning et mobile telecommunication systems complètent ce panorama, soulignant l'orientation du domaine vers l'optimisation des performances et l'intelligence connectée.

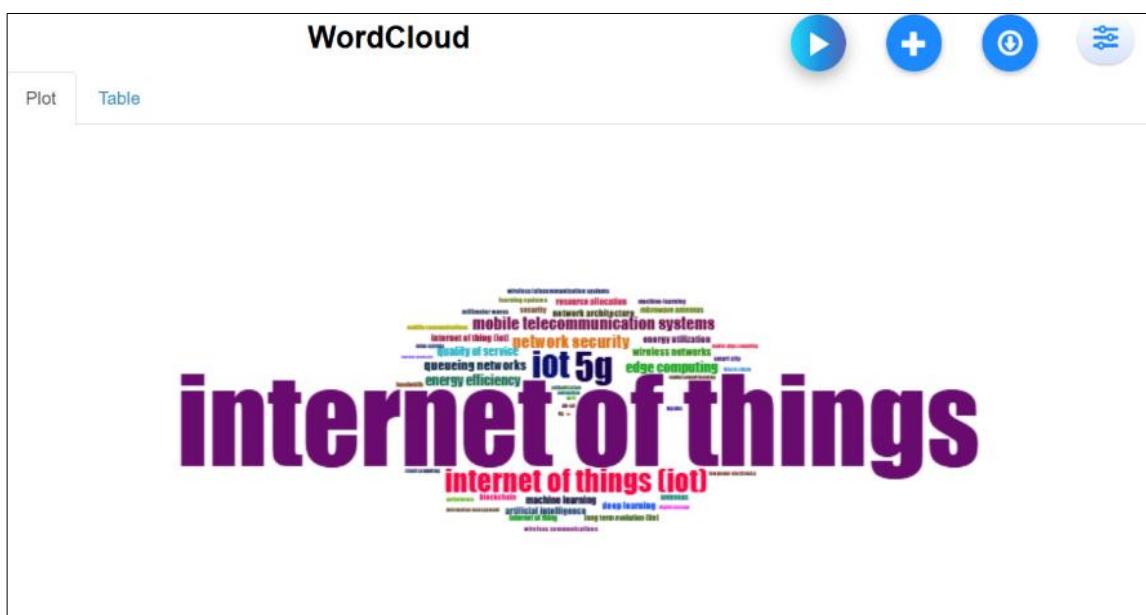


Figure 36: Word cloud

### 3.3.2.15 Tree map

L'analyse par carte proportionnelle (TreeMap) offre une perspective hiérarchique et quantitative essentielle pour décomposer la structure sémantique d'un vaste corpus documentaire. Contrairement aux représentations textuelles classiques, cet outil permet de segmenter le paysage thématique en zones proportionnelles à leur importance statistique, offrant ainsi une lecture immédiate du poids relatif de chaque concept.

Cette approche de visualisation des mots-clés permet de dégager plusieurs axes de compréhension

- Hiérarchisation des concepts pilier : La méthode permet d'identifier les thématiques hégémoniques qui structurent le domaine, souvent représentées par de larges segments correspondant aux technologies de base comme l'Internet des objets ou les réseaux mobiles de nouvelle génération.
- Mesure de la dominance statistique : En associant chaque bloc à un volume d'occurrences et à un pourcentage, l'outil quantifie précisément l'empreinte de chaque sujet sur la production totale, facilitant ainsi la distinction entre les domaines de recherche centraux et les niches spécialisées.
- Architecture modulaire de la recherche : La disposition en blocs permet de visualiser comment le domaine s'articule autour de piliers technologiques majeurs, tels que les infrastructures de communication, la sécurité informatique et les nouvelles architectures de calcul décentralisé.
- Confirmation des priorités scientifiques : Cette structure confirme visuellement que l'effort de recherche mondial se concentre prioritairement sur l'optimisation, la protection et la performance des réseaux connectés.

Cette figure présente une carte proportionnelle (TreeMap) qui hiérarchise les thématiques dominantes du corpus par le biais des mots-clés les plus fréquents. L'analyse est largement dominée par l'Internet of Things (7 496 occurrences, soit 17 %) et les systèmes de communication mobile 5G (6 663 occurrences, soit 15 %), suivis de piliers technologiques comme la sécurité réseau (1 116 occurrences) et le edge computing (914 occurrences). Cette structure modulaire permet de visualiser instantanément le poids relatif de chaque concept, confirmant que le cœur de la recherche se concentre sur l'infrastructure et la sécurité des réseaux connectés de nouvelle génération.

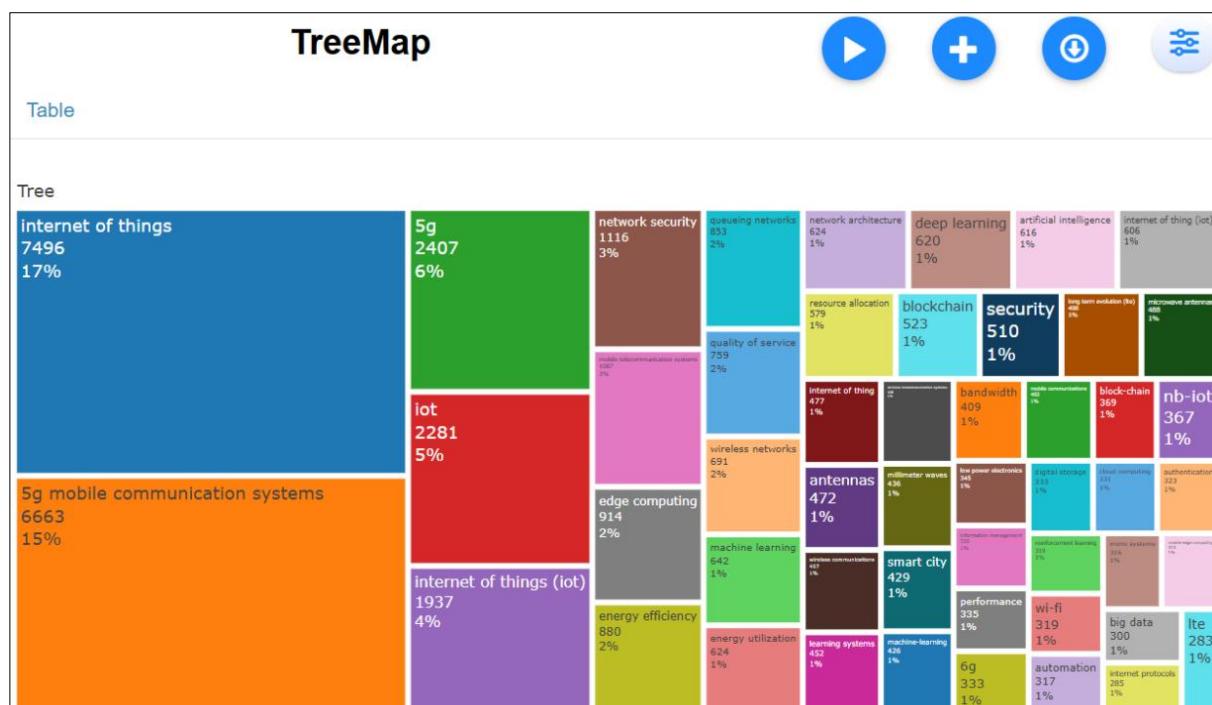


Figure 37: Tree map

### 3.3.2.16 Words' Frequency over Time

L'analyse de l'évolution temporelle de la fréquence des mots-clés constitue une méthode dynamique pour identifier les trajectoires de croissance, de maturation ou de déclin des concepts au sein d'un champ scientifique. Cette approche permet de transformer des données statiques en une vision longitudinale, révélant comment certains termes émergent pour devenir les nouveaux paradigmes d'un domaine de recherche.

Cette perspective chronologique met en évidence plusieurs phénomènes structurants :

- Identification des tendances lourdes : Le suivi cumulatif permet de repérer les concepts qui bénéficient d'une "ascension fulgurante", marquant ainsi les priorités stratégiques de la communauté scientifique mondiale sur une décennie.
- Mesure de l'accélération technologique : En observant les pentes des courbes, on peut distinguer les technologies à croissance exponentielle (comme les systèmes de communication mobile de nouvelle génération) de celles qui connaissent une progression plus modérée mais constante.
- Structuration des infrastructures numériques : L'évolution conjointe de termes liés au calcul décentralisé et à la protection des réseaux souligne une préoccupation croissante pour l'optimisation des performances et la résilience des systèmes connectés.
- Validation des cycles d'innovation : Cette visualisation sert de preuve statistique à l'expansion du corpus (passant de 500 à plus de 1 500 publications annuelles), en montrant précisément quels termes portent ce volume documentaire massif.

Cette figure illustre l'évolution temporelle de la fréquence des mots-clés (Words' Frequency over Time) entre 2015 et 2025, révélant une ascension fulgurante des thématiques liées à la connectivité moderne. On observe que les termes Internet of Things et 5G Mobile Communication Systems affichent les croissances cumulées les plus agressives, dépassant largement les 6 000 occurrences d'ici 2025. D'autres concepts comme le Edge Computing et la Network Security progressent de manière plus linéaire mais constante, confirmant une structuration durable du domaine autour de l'optimisation des performances et de la sécurisation des infrastructures numériques de nouvelle génération.

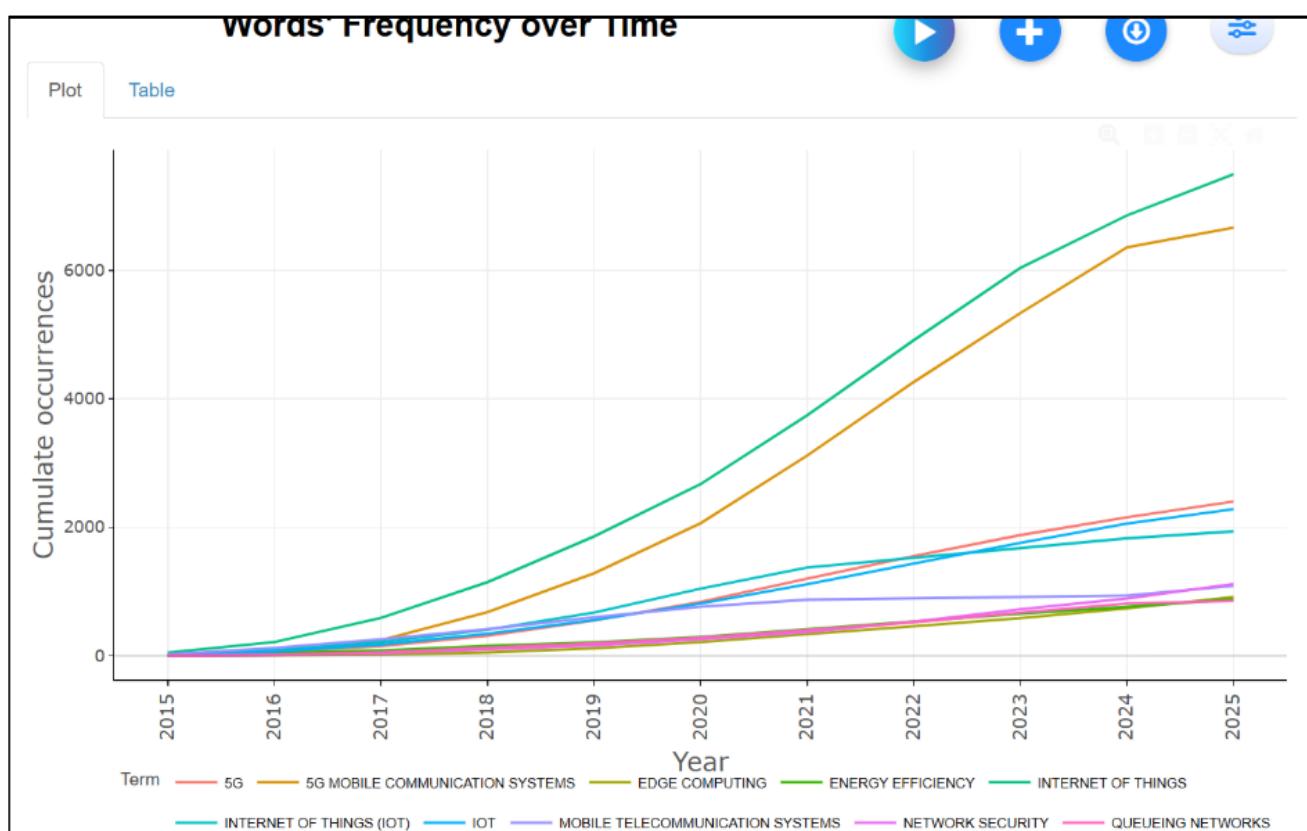


Figure 38: Words' Frequency over Time

### 3.3.2.17 Trend topics

L'analyse des thématiques émergentes (Trend Topics) est une méthode de prospective bibliométrique qui permet de cartographier le cycle de vie des idées scientifiques. En croisant la fréquence d'apparition des termes avec leur positionnement chronologique, cette approche permet de distinguer les technologies historiques, les concepts dominants et les signaux faibles qui préfigurent les recherches de demain.

Cette vision longitudinale met en lumière les mutations profondes du paysage intellectuel :

- Identification des transitions technologiques : Le suivi temporel permet d'observer le passage de protocoles fondamentaux (comme les premières normes de communication mobile) vers des infrastructures plus complexes et intégrées, marquant ainsi des sauts générationnels au sein du corpus.
- Cycles de maturité des concepts : L'outil identifie les périodes d'activité intense pour chaque mot-clé, révélant comment certains sujets atteignent un sommet de popularité avant de se stabiliser ou d'être remplacés par de nouveaux paradigmes.
- Détection de la "frontière de recherche" : En isolant les termes qui apparaissent massivement dans les années les plus récentes (comme 2024-2025), le chercheur peut identifier les axes d'innovation actuels, souvent tournés vers l'automatisation intelligente et l'optimisation des systèmes.
- Convergence disciplinaire : Cette analyse souligne souvent comment le domaine évolue d'une approche purement infrastructurelle vers une dimension plus analytique, intégrant des outils d'intelligence artificielle pour répondre aux nouveaux défis du secteur.

Cette figure illustre les thématiques émergentes (Trend Topics) du corpus entre 2015 et 2025, classant les termes selon leur période d'activité intense et leur fréquence. Le graphique révèle une transition technologique claire : les concepts pionniers comme le M2M et le LTE (dominants vers 2016-2017) ont progressivement laissé place à l'hégémonie de l'Internet of Things et de la 5G autour de 2021. Les tendances les plus récentes (2023-2025) montrent un glissement vers l'intelligence appliquée, avec une montée en puissance de l'apprentissage automatique (machine learning), de l'analyse prédictive et de la maintenance prédictive, marquant ainsi la maturité analytique du domaine.



**Figure 39 : Trend Topics**

### 3.3.2.18 Collaboration Network

L'analyse du réseau de collaboration des auteurs (Collaboration Network) permet de passer d'une vision statistique individuelle à une compréhension sociologique de la recherche. En bibliométrie, cette approche cartographique révèle la structure du capital social scientifique, illustrant comment les experts s'associent pour produire de nouvelles connaissances et comment les idées circulent à travers des groupes de travail interconnectés.

Cette analyse des réseaux de co-autorat met en lumière plusieurs caractéristiques fondamentales de la communauté académique :

- Détection des communautés de recherche : L'utilisation d'algorithme de spatialisation permet d'identifier des "clusters" (ou grappes), souvent représentés par des couleurs distinctes, qui regroupent des chercheurs travaillant sur des thématiques communes ou appartenant à des laboratoires partenaires.
- Identification des auteurs "piliers" : La taille des nœuds permet de repérer immédiatement les contributeurs les plus prolifiques, qui agissent souvent comme des chefs de file au sein de leur cluster respectif.
- Analyse de la cohésion scientifique : La densité des liens au sein d'un noyau central indique une forte collaboration interdisciplinaire ou géographique, tandis que des groupes plus isolés peuvent signaler des niches spécialisées ou des pôles de recherche émergents.
- Structure du leadership : La visualisation montre comment certains auteurs, par leur position centrale, servent de ponts entre différentes communautés, facilitant ainsi la diffusion de l'innovation et des standards technologiques à travers l'ensemble du réseau.

Cette figure illustre le réseau de collaboration entre les auteurs (Collaboration Network), mettant en évidence les structures sociales et les communautés de recherche au sein du domaine. Les nœuds représentent les auteurs, dont la taille est proportionnelle à leur volume de publications, tandis que les

liens indiquent la co-rédaction d'articles. On observe plusieurs clusters distincts colorés (rouge, bleu, vert, violet et orange), révélant des groupes de chercheurs qui travaillent étroitement ensemble, comme le noyau central dense autour de Wang Y, Wang X et Zhang J, ainsi qu'une communauté plus isolée sur la droite menée par des chercheurs tels que Kumar N et Kumar S.

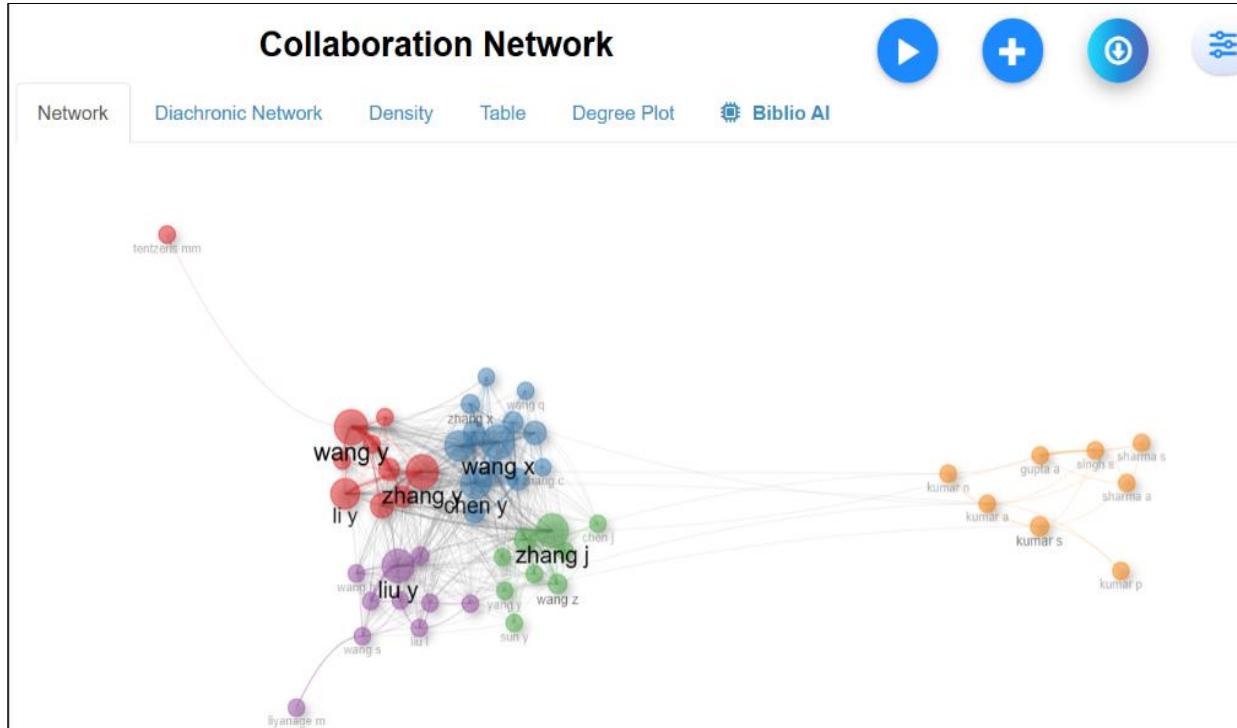


Figure 40: Collaboration Network

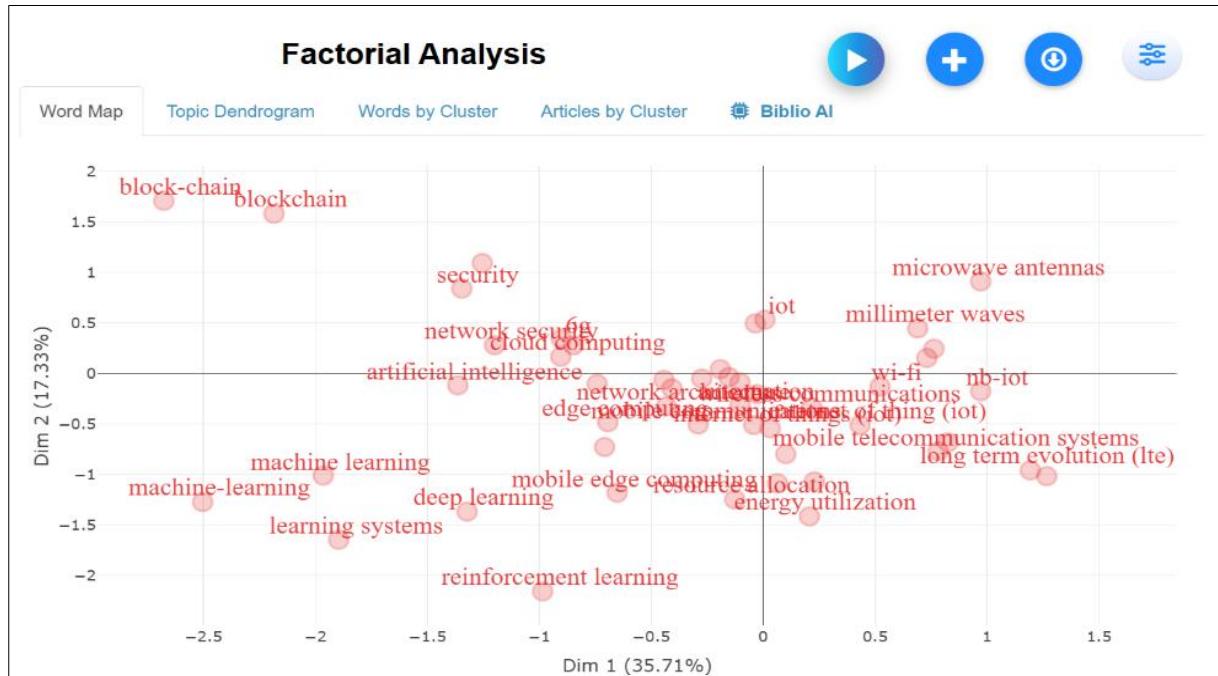
### 3.3.2.19 Factorial analysis

L'analyse factorielle appliquée aux mots-clés constitue une méthode avancée de cartographie sémantique qui permet de réduire la complexité d'un vaste corpus en dimensions intelligibles. Contrairement à une simple liste de fréquences, cette approche statistique analyse la co-occurrence des termes pour identifier la structure intellectuelle et les courants de pensée qui organisent le domaine de recherche.

Cette visualisation spatiale permet d'explorer l'organisation du savoir selon plusieurs axes :

- Regroupement par proximité conceptuelle : Les termes qui apparaissent fréquemment ensemble dans les mêmes publications sont projetés à proximité les uns des autres, formant des clusters thématiques cohérents qui révèlent les spécialisations du domaine.
- Réduction de la variance : En utilisant des méthodes telles que l'Analyse des Correspondances Multiples (ACM), la carte capture les principales tendances (explicant souvent plus de 50 % de la variance), ce qui permet de distinguer les thématiques dominantes des bruits statistiques.
- Polarisation thématique : La projection sur deux dimensions permet de visualiser des oppositions ou des complémentarités, comme la distinction entre les recherches sur les infrastructures physiques (réseaux, ondes) et celles portant sur les couches logicielles et algorithmiques (intelligence artificielle, sécurité).
- Identification des ponts technologiques : La position des mots-clés entre deux pôles permet de repérer les zones d'interconnexion, montrant comment des concepts comme l'apprentissage automatique s'intègrent progressivement dans l'optimisation des réseaux de communication.

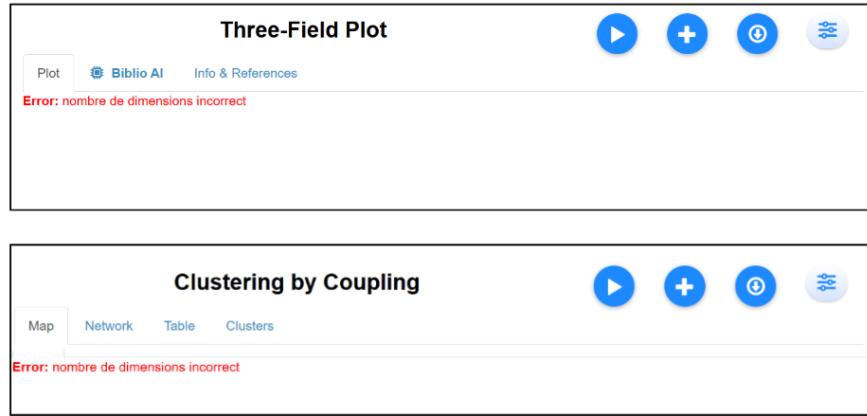
Cette figure présente une analyse factorielle (Factorial Analysis) sous forme de carte sémantique (Word Map), permettant de visualiser la structure intellectuelle du corpus en regroupant les mots-clés selon leur proximité conceptuelle. Les deux dimensions expliquent plus de 50 % de la variance totale, distinguant clairement des pôles technologiques majeurs : à gauche, un pôle orienté vers l'intelligence artificielle (machine learning, reinforcement learning) et la sécurité (blockchain), tandis qu'à droite se concentrent les infrastructures de communication (5G, mobile edge computing, millimeter waves). Cette cartographie spatiale aide à identifier les thématiques qui co-occurrent fréquemment, révélant ainsi les domaines d'interconnexion entre les technologies de réseau et les systèmes d'apprentissage automatisé.



**Figure 41: Factorial analysis**

### 3.3.2.20 Ajustements méthodologiques et contraintes techniques du corpus

Dans le cadre de cette présentation, il est important de noter l'absence de deux analyses précédemment incluses : le Three-Field Plot et le Most Relevant Documents. Ce changement s'explique par l'utilisation d'une nouvelle base de données uniforme et volumineuse, adoptée suite aux directives reçues lors de la dernière séance de présentation afin d'harmoniser les travaux de notre groupe. En raison de la taille considérable de cette nouvelle base, le traitement de ces visualisations spécifiques a rencontré des limites techniques (erreurs de dimensions), empêchant leur génération correcte dans cette version finale du rapport.



**Figure 42 :** Limites techniques et erreurs de génération rencontrées sur BiblioShiny lors du traitement de la base de données volumineuse

### 3.4 VOSviewer

L’outil central mobilisé pour la cartographie de notre étude est **VOSviewer** (Visualization of Similarities Viewer). Développé par le Centre d’Études Scientifiques et Technologiques (CWTS) de l’Université de Leiden, ce logiciel s’est imposé comme une référence incontournable dans le domaine de la scientométrie.

Contrairement aux outils statistiques classiques qui produisent des tableaux ou des graphiques en barres, VOSviewer est spécialisé dans la construction de **réseaux bibliométriques basés sur la distance**. Le principe algorithmique fondamental est le suivant : la proximité spatiale entre deux noeuds (items) sur la carte reflète directement la force de leur relation. Plus deux éléments (auteurs, mots-clés, références) sont proches visuellement, plus leur lien de co-occurrence ou de co-citation est fort.

Comme le présente l’interface d’accueil visible sur la **Figure 44**, le logiciel a été conçu pour traiter de grands volumes de données tout en offrant une lisibilité optimale grâce à trois modes de visualisation distincts, essentiels à notre analyse :

- **La visualisation en réseau (Network Visualization)** : C’est la vue par défaut. Elle permet d’identifier les clusters (regroupements). Chaque cluster est coloré différemment et rassemble les éléments fortement liés entre eux, révélant ainsi les communautés de chercheurs ou les écoles de pensée thématiques.
- **La visualisation de superposition (Overlay Visualization)** : Cette vue reprend la structure du réseau mais applique un code couleur basé sur une variable temporelle (ex : l’année moyenne de publication). Cela est crucial pour notre étude car cela permet de distinguer les thèmes historiques ("matures") des sujets émergents ("récents") dans le domaine de l’IoT et de la 5G.
- **La visualisation de densité (Density Visualization)** : Similaire à une carte thermique (heat-map), cette vue met en lumière les zones de forte concentration. Elle est particulièrement utile pour repérer immédiatement les concepts "chauds" ou les auteurs incontournables qui saturent l’espace de recherche.

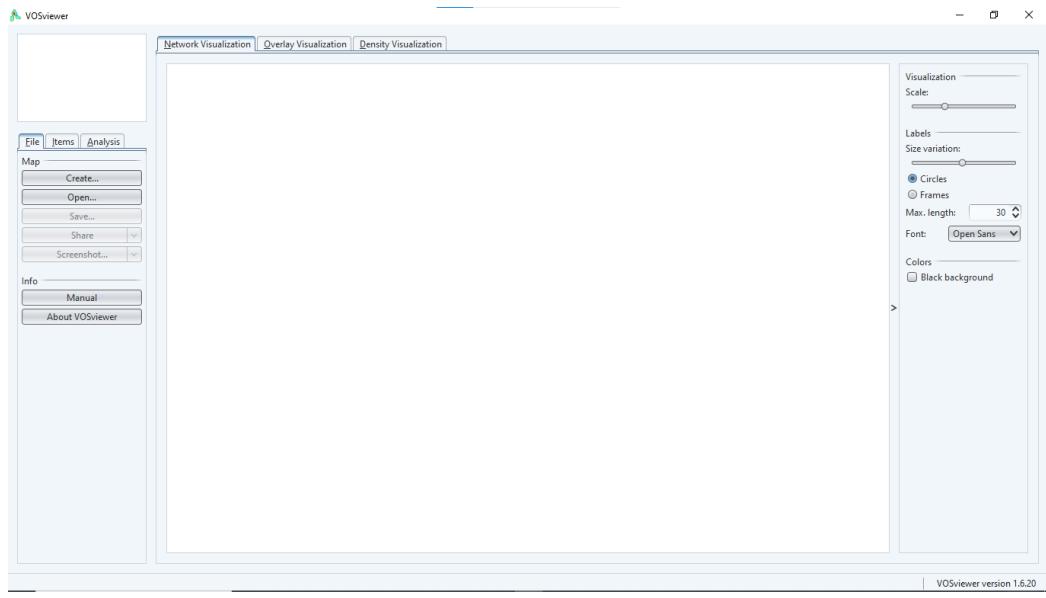


Figure 43 : Interface de présentation et d'accueil du logiciel VOSviewer

**Processus de configuration et création de la carte :** Pour générer une cartographie pertinente et exploitable, nous avons suivi un protocole rigoureux via l'assistant de configuration du logiciel. Ce processus se décline en six étapes clés, détaillées ci-dessous.

### 3.4.1 Initialisation du projet bibliométrique

L'analyse débute par le lancement de l'assistant "Create Map". Cette interface, illustrée par la **Figure 45**, ne se contente pas de lancer un nouveau projet ; elle impose une structure séquentielle à l'analyse. Cette approche pas-à-pas est méthodologiquement déterminante car elle oblige le chercheur à valider explicitement chaque paramètre de configuration avant de progresser. Cela réduit considérablement les risques d'incohérence dans le traitement des données et assure la reproductibilité de l'étude.

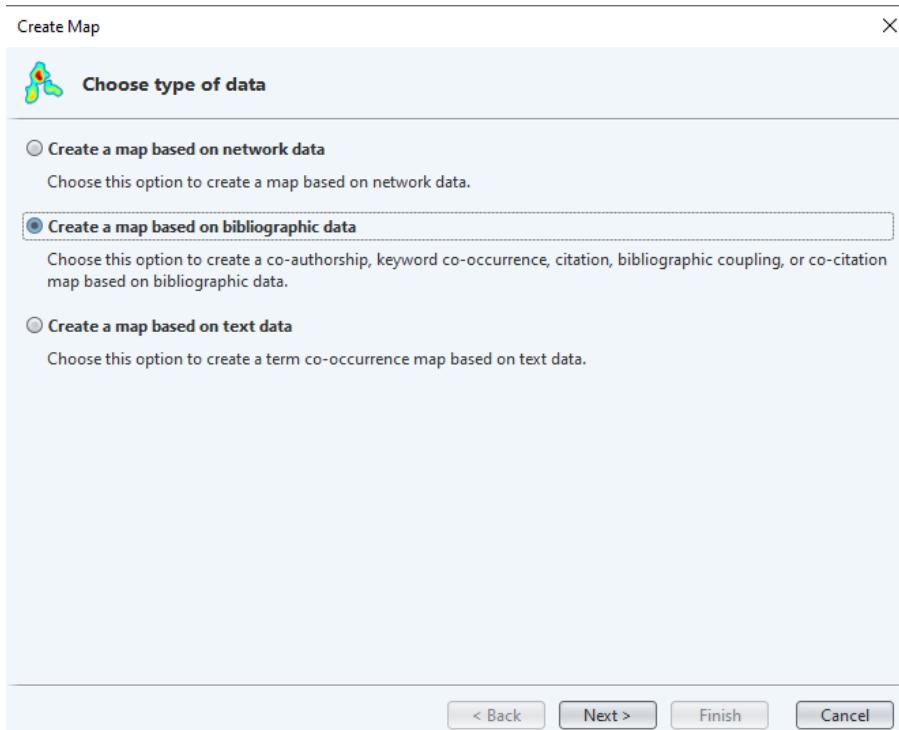
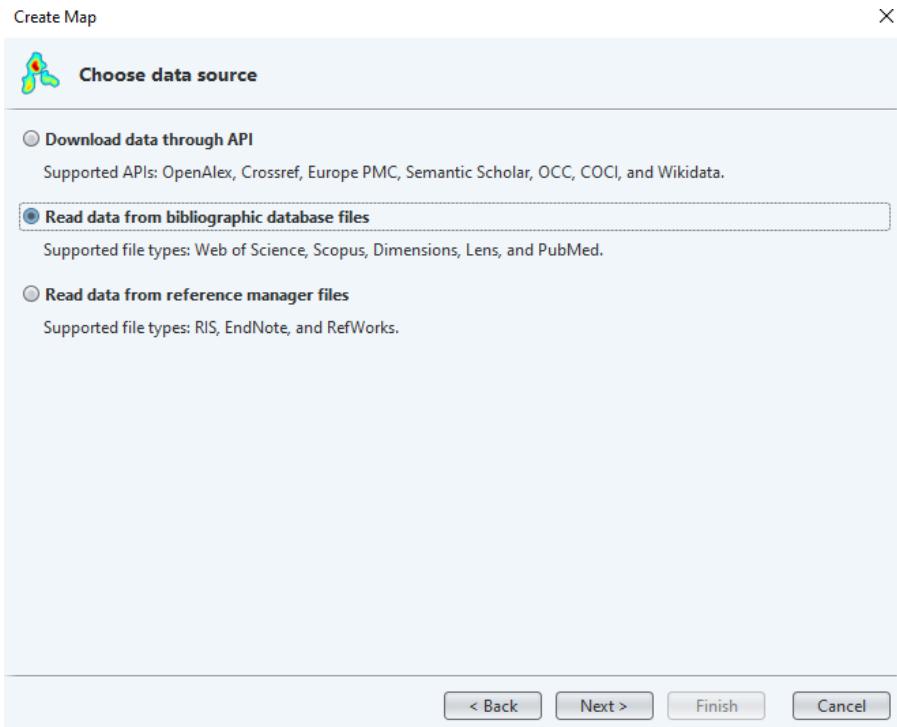


Figure 44 : Assistant de création de carte (Create Map)

### 3.4.2 Sélection de la typologie des données

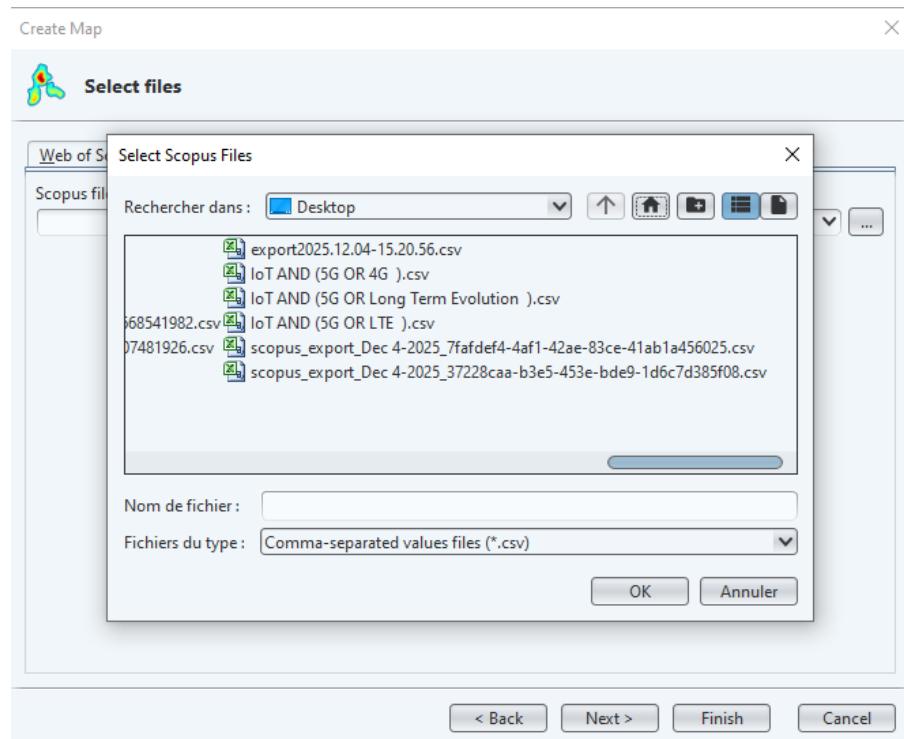
Le choix de la source d'information est une étape critique qui conditionne l'ensemble des résultats. Pour cette étude, nous avons spécifiquement sélectionné l'option "**Create a map based on bibliographic data**". Comme le montre la **Figure 46**, cette option distingue notre approche des analyses de texte brut (Text mining) ou des réseaux pré-construits. En travaillant sur les données bibliographiques, nous exploitons directement les métadonnées structurées issues des bases de données scientifiques.



**Figure 45 : Sélection du mode d'analyse "Données bibliographiques"**

### 3.4.3 Importation et parsing du corpus

La phase d'alimentation des données est visualisée en **Figure 47**. Elle consiste en l'importation du fichier CSV, préalablement extrait de la base Scopus (ou IEEE/WoS). À ce stade, VOSviewer effectue une opération de "parsing" : il reconnaît automatiquement le format spécifique de la base de données d'origine pour en extraire intelligemment les entités.



**Figure 46 : Importation du fichier de données bibliographiques**

### 3.4.4 Analyse automatique et indexation des champs

Suite à l'importation, le logiciel procède à une lecture intégrale du contenu pour identifier et indexer les champs essentiels à l'analyse (titres, années, sources). La **Figure 48** illustre cette phase de validation interne où le logiciel vérifie l'intégrité de la structure du fichier.

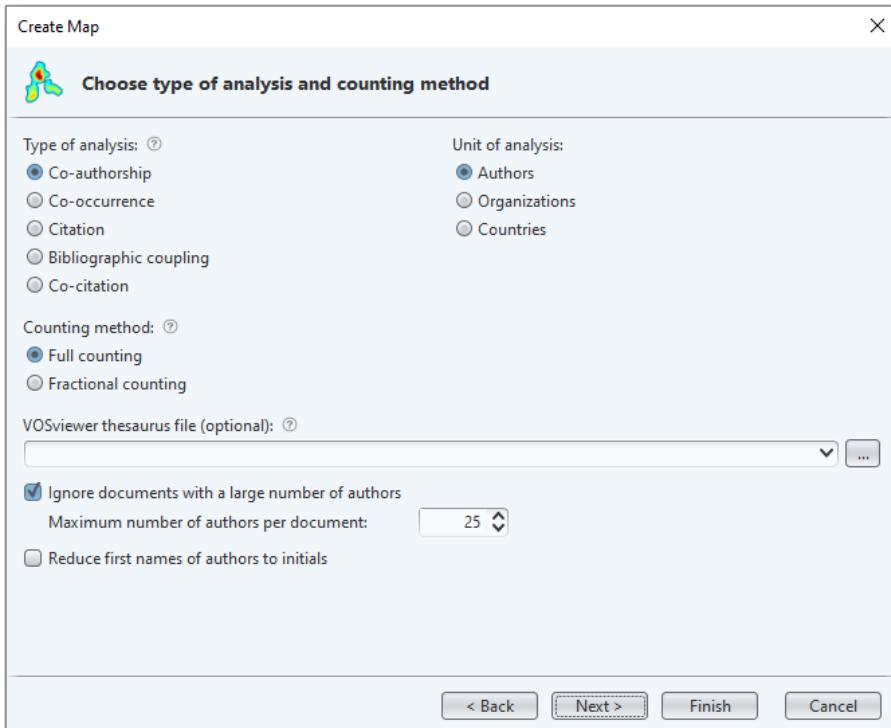
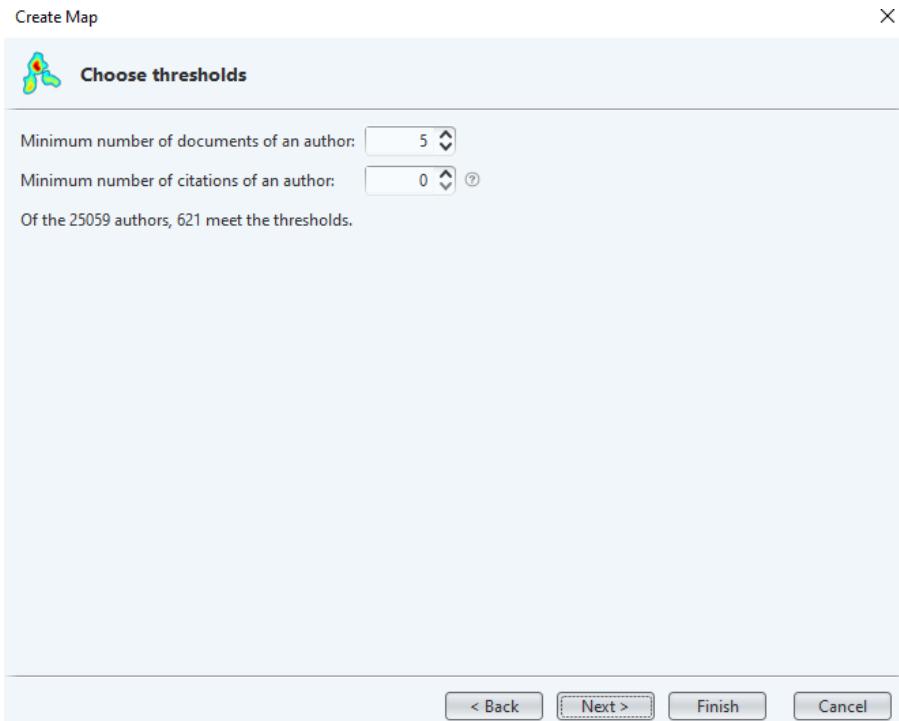


Figure 47 : Reconnaissance et validation automatique des métadonnées

### 3.4.5 Filtrage par seuils (Thresholds) et réduction du bruit

Une analyse bibliométrique brute sur plusieurs milliers d'auteurs produirait une carte illisible. Il est donc impératif d'appliquer des filtres statistiques. Nous avons configuré un seuil minimal de production scientifique (ex : 5 documents) et utilisé l'indicateur du *Total Link Strength* (TLS). Comme le démontre la **Figure 49**, cette opération permet de condenser le corpus initial à une liste pertinente de chercheurs influents.



**Figure 48 : Configuration des seuils de filtrage et réduction du corpus**

### 3.4.5 Validation manuelle et nettoyage final

La dernière étape est le contrôle qualité humain. La liste présentée en **Figure 50** offre une interface pour vérifier les entités sélectionnées. Cette phase est cruciale pour la désambiguisation (fusion des homonymes) et la validation des leaders académiques identifiés.

Selected	Author	Documents	Citations	Total link strength
<input checked="" type="checkbox"/>	tentzeris, manos m.	33	387	81
<input checked="" type="checkbox"/>	tanwar, sudeep	32	1113	68
<input checked="" type="checkbox"/>	araniti, giuseppe	21	244	60
<input checked="" type="checkbox"/>	moltchanov, dmitri a.	17	187	58
<input checked="" type="checkbox"/>	pizzi, sara	17	205	56
<input checked="" type="checkbox"/>	molinaro, antonella	15	167	52
<input checked="" type="checkbox"/>	gupta, rajesh	20	302	50
<input checked="" type="checkbox"/>	kumar, neerai sathish	28	2021	49
<input checked="" type="checkbox"/>	lynch, charles a.	14	90	48
<input checked="" type="checkbox"/>	muthanna, ammar s.a.	21	265	47
<input checked="" type="checkbox"/>	abdellah, chehri	19	411	44
<input checked="" type="checkbox"/>	iera, a.	14	240	43
<input checked="" type="checkbox"/>	liyanage, madhusanka	27	1402	41
<input checked="" type="checkbox"/>	hošek, jiří	11	87	40
<input checked="" type="checkbox"/>	masek, pavel	10	81	40
<input checked="" type="checkbox"/>	stusek, martin	10	81	40
<input checked="" type="checkbox"/>	de matos patrocínio dos santos, bernardo...	9	68	39
<input checked="" type="checkbox"/>	feng, boning	9	68	39
<input checked="" type="checkbox"/>	jadav, nilesh kumar	16	111	39
<input checked="" type="checkbox"/>	koucheryavy, andrey e.	16	274	39

**Figure 49 : Interface de validation manuelle des auteurs sélectionnés**

### 3.4.6 Analyse des réseaux de mots-clés : Structure et dynamiques

L'analyse sémantique repose sur l'exploitation des métadonnées issues de notre corpus. Grâce au logiciel VOSviewer, nous avons générée une cartographie complète permettant de visualiser les connexions intellectuelles entre les concepts.

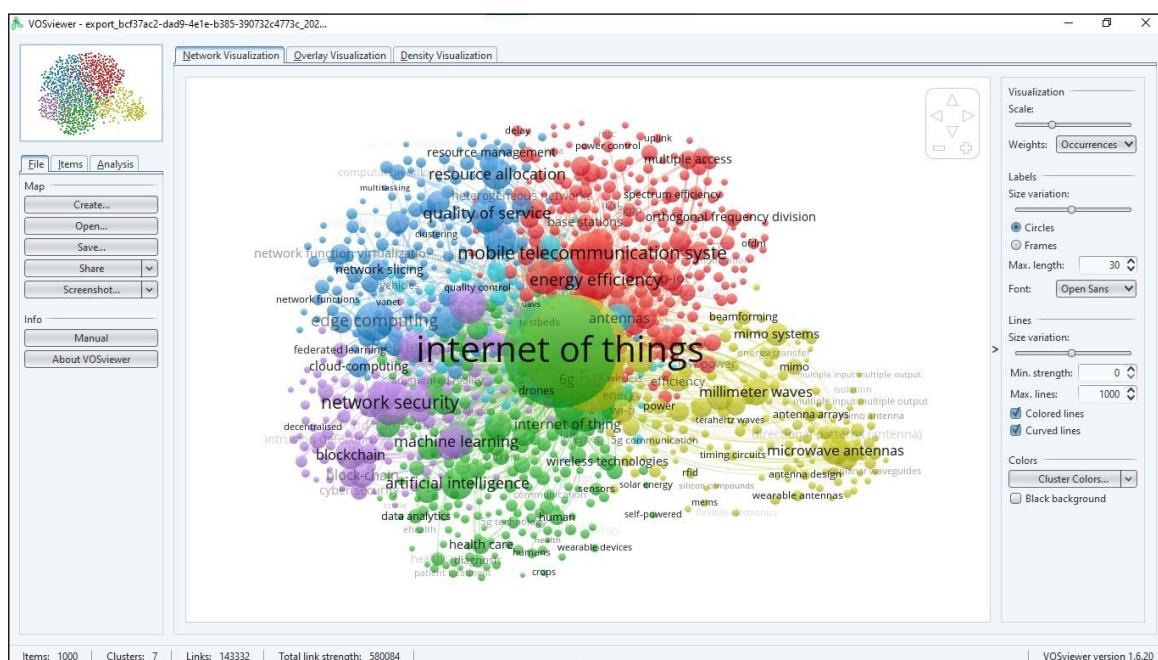
### 3.4.6.1 Structure du réseau de co-occurrence

Cette première visualisation met en lumière l'architecture globale du domaine. L'analyse porte sur un ensemble de **1000 mots-clés**, structurés en **7 clusters thématiques**, totalisant une force de lien (*Total Link Strength*) impressionnante de **580 084**.

Comme l'illustre la **Figure 51**, le terme « **Internet of Things** » occupe une position hégémonique au centre du réseau. Il agit comme le pivot gravitationnel vers lequel convergent toutes les technologies de rupture de la 5G.

L'analyse détaillée des clusters révèle des piliers technologiques distincts :

- **Cluster Jaune (Infrastructure Matérielle)** : Ce groupe se focalise sur la couche physique nécessaire au haut débit, incluant les ondes millimétriques (*millimeter waves*), les systèmes MIMO massifs et les réseaux d'antennes.
  - **Cluster Rouge (Optimisation des Performances)** : Il cible l'efficience du réseau, regroupant des termes liés à l'efficacité énergétique (*energy efficiency*) et à l'allocation dynamique des ressources.
  - **Clusters Bleu et Vert (Intelligence et Virtualisation)** : L'émergence massive de l'*Edge Computing*, du *Network Slicing* (en bleu) et de l'intelligence artificielle (en vert) souligne le passage d'une connectivité 4G conventionnelle vers un écosystème 5G capable de gérer une densité massive d'objets.
  - **Cluster Violet (Confiance Numérique)** : Enfin, l'intégration de la sécurité réseau et de la *Blockchain* complète ce panorama, illustrant la transition vers un IoT sécurisé pour l'industrie 4.0 et la santé.



**Figure 50 : Cartographie des clusters thématiques (VOSviewer)**

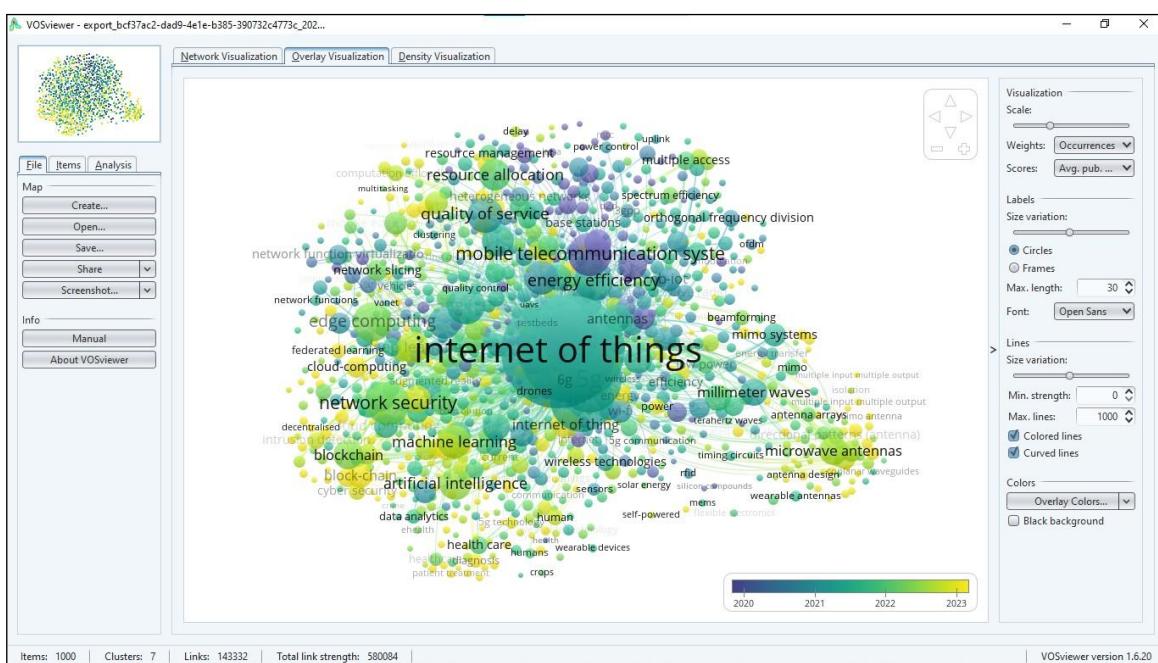
### 3.4.6.2 Dynamique temporelle de la collaboration scientifique

La visualisation temporelle (*Overlay Visualization*), présentée en **Figure 52**, permet d'analyser l'évolution des centres d'intérêt sur la période 2020-2023. Le gradient de couleurs, allant du violet/bleu (ancien) au jaune vif (récent), illustre un basculement technologique majeur.

L'analyse chronologique révèle trois phases distinctes :

1. **Période 2020-2021 (Teintes Bleues)** : La recherche se concentrat encore sur les infrastructures héritées, les systèmes de télécommunications mobiles classiques et les problématiques de Qualité de Service (QoS).
2. **Période Intermédiaire (Teintes Vertes)** : Cette phase marque la maturation des technologies de virtualisation et de décentralisation, notamment l'*Edge Computing*, le *Network Slicing* et l'intégration progressive de l'IA.
3. **Fronts de recherche 2023 (Teintes Jaunes)** : Les travaux les plus récents se déplacent vers l'optimisation fine de l'efficacité énergétique et la sécurisation décentralisée via la *Blockchain* et l'Apprentissage Fédéré (*Federated Learning*).

Cette cartographie confirme une transition structurelle profonde : le passage d'une architecture Cloud centralisée vers un IoT 5G distribué, où la résilience systémique est devenue la priorité mondiale.



**Figure 51 : Dynamique temporelle et fronts de recherche récents**

### 3.4.6.3 Cartographie thermique de l'activité scientifique

La carte de densité (*Density Visualization*), visible sur la **Figure 53**, illustre visuellement les centres de gravité de la recherche à travers un dégradé thermique. Elle est générée à partir des 143 332 liens identifiés entre les mots-clés.

L'analyse de cette carte met en évidence plusieurs points clés :

- **Point d'incandescence** : La zone jaune maximale est occupée par l'« Internet of Things », confirmant sa position de pilier central autour duquel s'articulent toutes les autres innovations.

- **Zones de forte densité :** On observe une activité particulièrement élevée (zones vert-jaune) autour de l'*Energy Efficiency*, de la *Quality of Service* et du *Edge Computing*. Cela témoigne des priorités actuelles pour répondre aux exigences de la 5G.

- **Changement de paradigme :** Le glissement du *Cloud Computing* vers une position plus périphérique au profit de l'*Edge Computing* souligne un changement architectural majeur : le passage d'une connectivité centralisée à une infrastructure distribuée et intelligente.

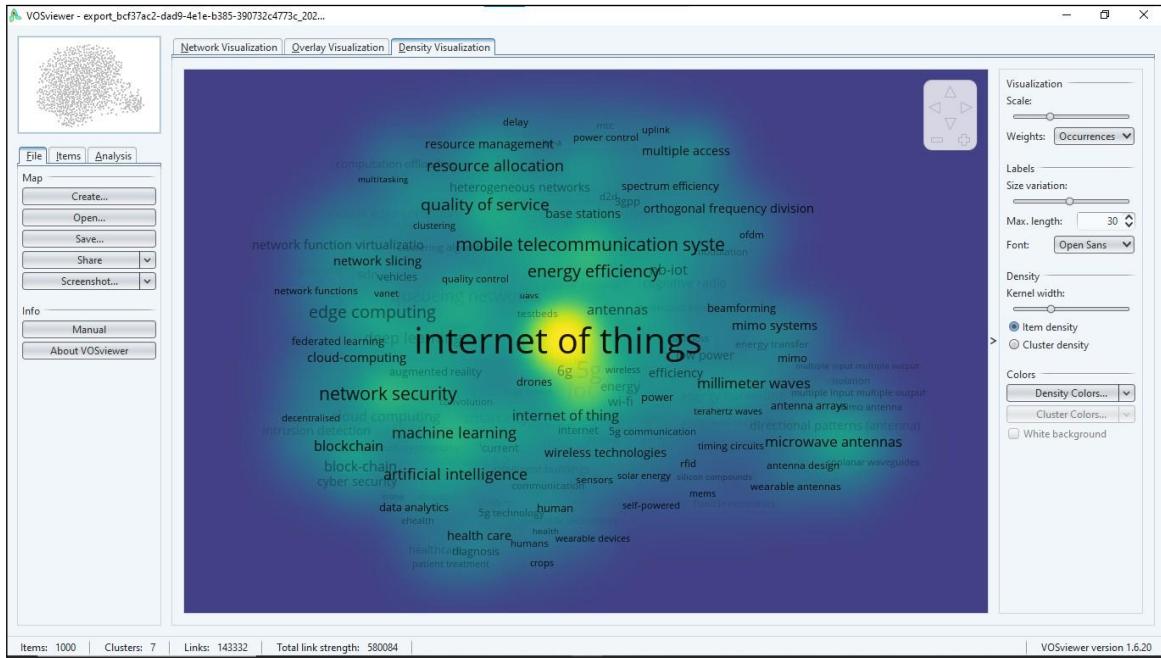


Figure 52 : Carte de densité thermique des thématiques de recherche

### 3.4.7 Analyse des réseaux de co-auteurs : Structure et collaborations

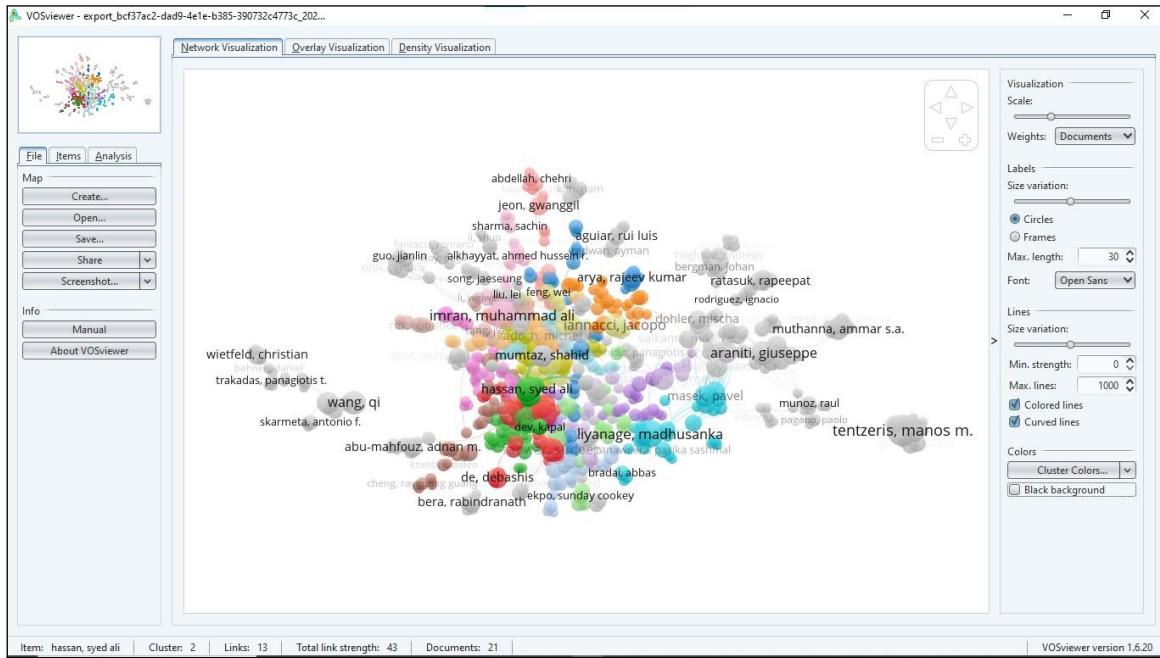
Cette section explore la structure sociale de la production scientifique. Elle permet d'identifier les leaders académiques, les dynamiques de collaboration et l'évolution temporelle des communautés de chercheurs.

#### 3.4.7.1 Structure du réseau de collaboration scientifique

La cartographie du réseau, générée par VOSviewer, illustre l'interconnexion entre les chercheurs, où la taille de chaque nœud est proportionnelle au volume de publications. L'analyse révèle un éco-système de recherche globalisé, organisé en **31 clusters de collaboration**.

Comme le montre la **Figure 54**, on observe une concentration majeure de l'activité au centre du graphe, portée par des figures pivots :

- **Les Hubs Centraux :** Des chercheurs comme **Syed Ali Hassan** (identifié avec 21 documents et une force de lien de 43 au sein du cluster 2), ainsi que **Muhammad Ali Imran** et **Madhu-sanka Liyanage**, agissent comme des connecteurs facilitant la diffusion des connaissances.
- **Les Niches Spécialisées :** En périphérie, la présence de groupes plus isolés, comme celui de **Manos M. Tentzeris**, souligne l'existence de niches technologiques hautement spécialisées. Cette topologie complexe permet de visualiser les "ponts de coopération" qui structurent l'évolution des sous-domaines scientifiques à l'échelle internationale.



**Figure 53 : Structure des collaborations scientifiques (31 clusters identifiés)**

### 3.4.7.2 Dynamique temporelle et fronts de recherche émergents

La visualisation en mode « Overlay » (**Figure 55**) apporte une dimension chronologique essentielle. Le gradient de couleurs, allant du violet (2019) au jaune vif (2023), illustre l'évolution dynamique du réseau qui totalise une force de lien de **4 365** répartie sur **40 clusters**.

L'analyse permet de distinguer les générations de chercheurs :

- **La consolidation (Vert/Bleu)** : Le cœur du réseau témoigne d'une forte interdisciplinarité historique où les collaborations s'entrecroisent pour former un noyau d'innovation robuste.
- **Les nouveaux entrants (Jaune)** : Des chercheurs comme **Madhusanka Liyanage, Qi Wang et Manos M. Tentzeris** apparaissent en jaune. Cela signale qu'ils sont à la pointe des publications les plus actuelles (2023) et qu'ils pilotent les fronts de recherche émergents.

Cette cartographie confirme une transition nette des publications pionnières en périphérie vers une intensification centrale et récente de l'activité scientifique.



**Figure 54 : Dynamique temporelle des collaborations (2019-2023)**

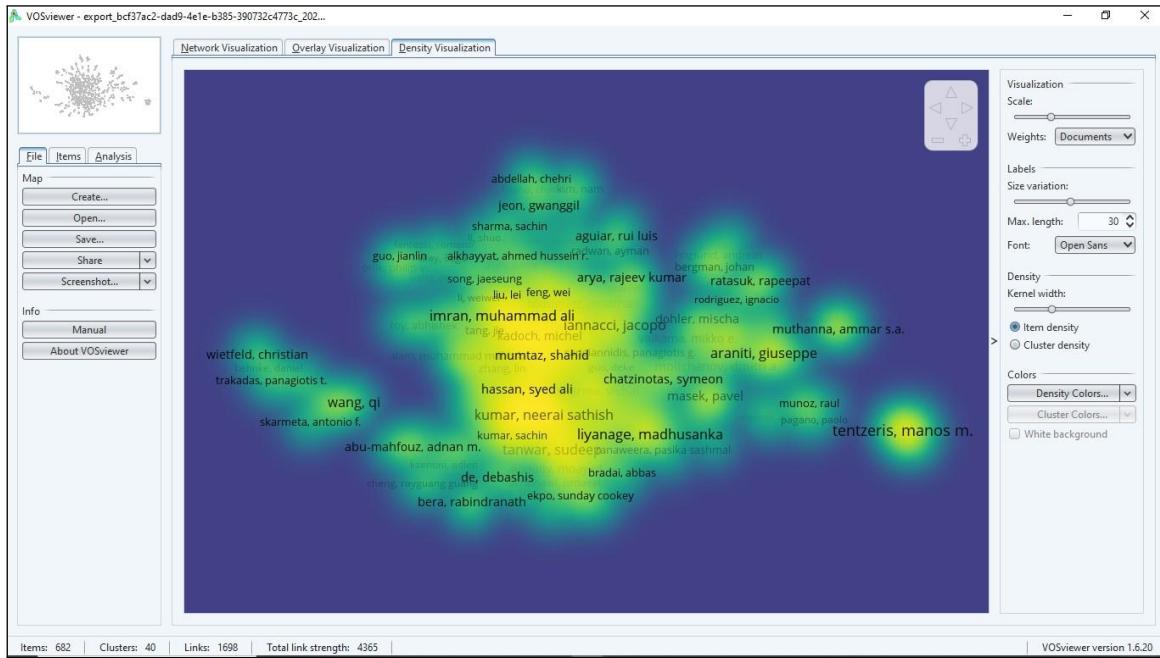
### 3.4.7.3 Cartographie thermique et pôles d'influence

La carte de densité (**Figure 56**) met en évidence les pôles d'activité majeurs à travers un dégradé thermique. Elle se base sur un total de **682 chercheurs interconnectés par 1 698 liens**.

L'analyse de cette visualisation illustre une structure hiérarchisée :

- **Le Noyau Dur (Incandescence Jaune)** : Les zones jaunes incandescentes désignent les équipes les plus productives. Ce noyau est formé par le groupe **Imran, Mumtaz, Hassan et Liyanage**, confirmant leur statut de leaders influents dans le domaine IoT-5G.
- **Les Corridors de Connaissance (Vert)** : Les zones vertes reliant ces centres de masse témoignent d'une circulation fluide des connaissances entre les différentes communautés.
- **Les Zones Satellites** : Des experts comme Manos M. Tentzeris sur la droite du graphe représentent des pôles d'excellence distincts.

Cette vue permet d'identifier précisément les moteurs de l'innovation et les opportunités de synergies entre les communautés établies et les zones émergentes.



**Figure 55 : Carte thermique de l'activité scientifique des auteurs**

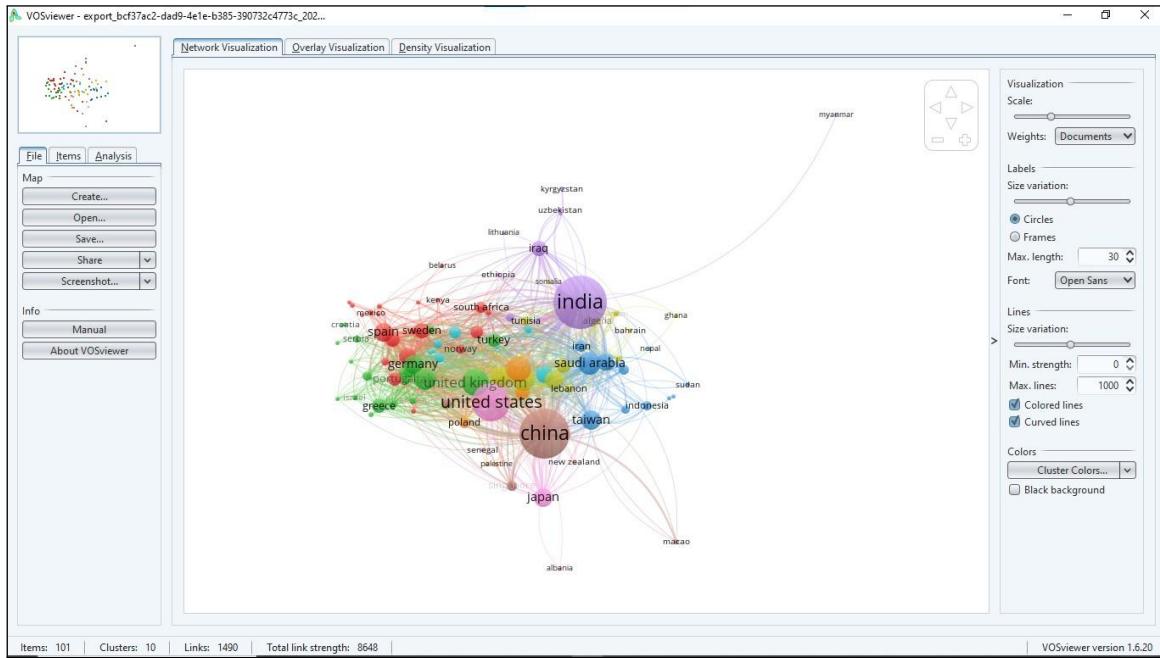
#### 3.4.7.4 Analyse des réseaux des pays : Structure et dynamiques géographiques

Cette section propose une cartographie macroscopique de l'écosystème mondial de la recherche sur l'IoT et la 5G. Elle repose sur l'analyse géographique de **101 pays** interconnectés, permettant de visualiser les pôles de compétitivité et les nouvelles alliances internationales.

#### 3.4.7.5 Structure de la coopération internationale

L'analyse structurelle du réseau met en évidence une coopération internationale intense. Le graphe est constitué de **1 490 liens de collaboration** organisés en **10 clusters** distincts, cumulant une force totale de lien (*Total Link Strength*) de **8 648**.

Cette densité relationnelle témoigne d'une recherche qui ne se fait plus en vase clos, mais via des consortiums transnationaux. Les clusters identifiés regroupent souvent des pays partageant des proximités géographiques ou des intérêts stratégiques communs dans le déploiement des infrastructures télécoms de nouvelle génération.



**Figure 56 : Cartographie mondiale des collaborations (101 pays, 10 clusters)**

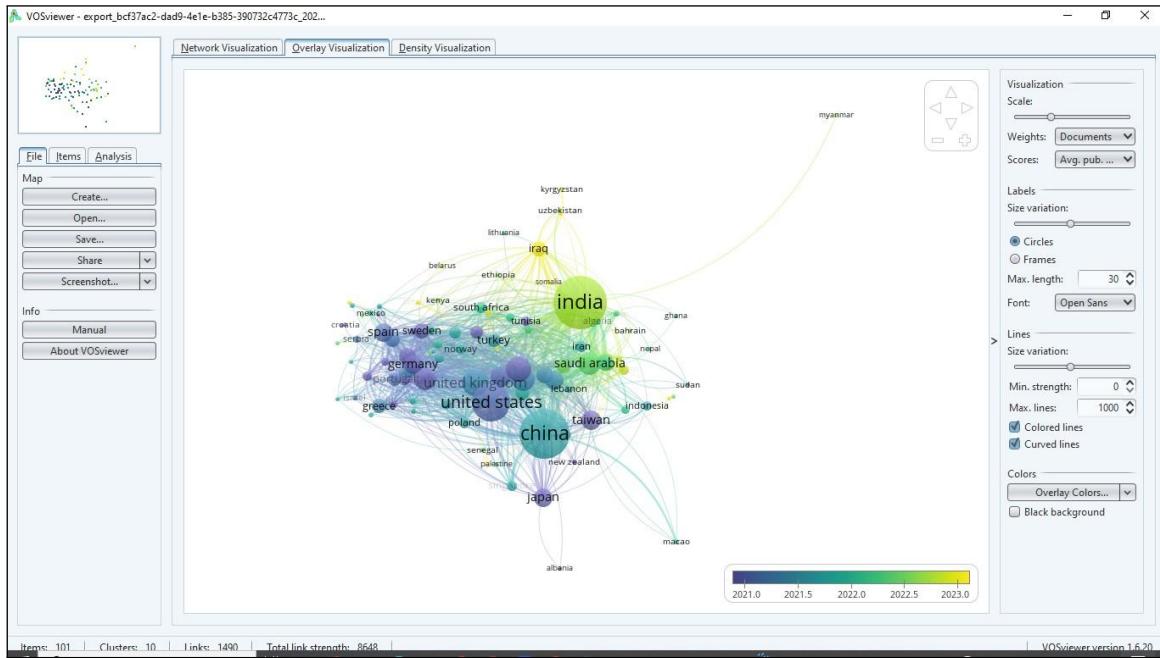
### 3.4.7.6 Basculement géopolitique et émergence asiatique

L’analyse temporelle (*Overlay Visualization*), présentée en **Figure 58**, révèle un basculement géopolitique crucial dans la production de savoir.

L’évolution chronologique se lit comme suit :

- **Les Fondations (Tons Bleus/VERTS - 2021)** : Les puissances occidentales (États-Unis, Royaume- Uni) ainsi que la Chine ont établi les bases fondamentales de la recherche dès 2021.
- **La Nouvelle Vague (Tons Jaunes - 2022/2023)** : On observe une poussée spectaculaire et récente de pays émergents tels que l'**Inde, l'Iraq et le Pakistan**.

Cette dynamique souligne un déplacement du centre de gravité de l’innovation vers l’Asie du Sud et le Moyen-Orient, où des investissements massifs transforment ces nations en moteurs essentiels du développement des futurs réseaux de communication globaux.



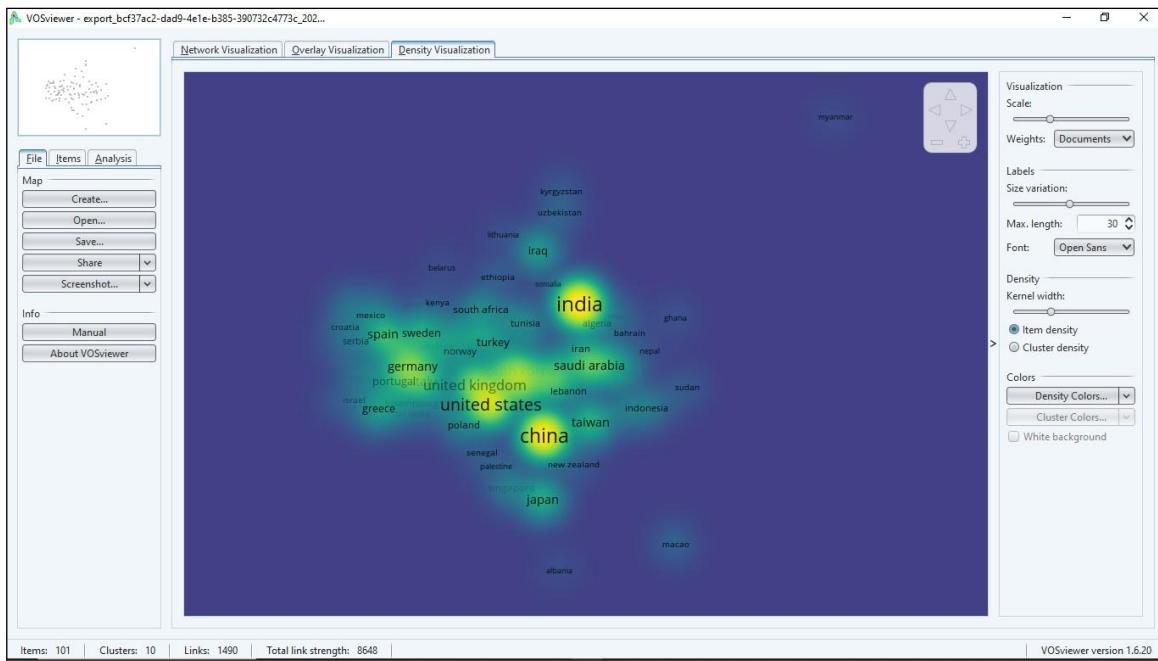
**Figure 57 : Dynamique temporelle : Le déplacement du centre de gravité vers l'Asie**

### 3.4.7.7 Pôles d'incandescence et hégémonie scientifique

La carte de densité (**Figure 59**) confirme visuellement la hiérarchie mondiale actuelle à travers l'intensité des foyers d'activité.

L'analyse des zones de chaleur met en exergue :

- **Une Hégémonie Sino-Indienne** : La Chine et l'Inde apparaissent comme les deux foyers d'activité les plus "incandescents" (zones jaune vif). Leur domination volumétrique est incon-testable.
- **Les Pôles Majeurs Historiques** : En soutien, des acteurs comme les **États-Unis, le Royaume- Uni et l'Arabie Saoudite** maintiennent des positions centrales, agissant souvent comme des ponts de collaboration entre l'Orient et l'Occident.



**Figure 58 : Carte de densité : Hégémonie de la Chine et de l'Inde**

## Conclusion

En conclusion, ce chapitre de réalisation a permis de transformer une masse de données brutes en une cartographie stratégique claire et exploitable. Grâce à la synergie entre Power BI, VOSviewer, Gephi et Biblioshiny, nous avons objectivé l'explosion de la recherche mondiale sur la convergence IoT-5G depuis 2017. Nos analyses confirment non seulement le leadership incontesté de l'axe Chine-Inde, mais révèlent aussi un basculement thématique majeur vers l'intelligence distribuée (AIoT) et l'Edge Computing. Ces résultats valident la robustesse de notre protocole et constituent la base solide sur laquelle s'appuient désormais notre conclusion générale et nos perspectives d'avenir.

# Conclusion générale

Ce projet d'analyse bibliométrique a permis d'explorer en profondeur les dynamiques scientifiques et technologiques à l'intersection de l'Internet des Objets (IoT) et des réseaux mobiles de nouvelle génération (4G/5G). En nous appuyant sur un corpus rigoureux extrait de la base **IEEE Xplore** pour la période 2017-2025, nous avons pu transformer une masse documentaire de plus de 12 000 articles en une cartographie stratégique claire et structurée.

Au terme de cette étude, plusieurs enseignements majeurs se dégagent. Tout d'abord, l'analyse temporelle confirme une **croissance exponentielle** de la recherche, marquant le passage définitif de la 4G vers la **5G** comme catalyseur indispensable de l'IoT massif. Sur le plan géographique, nous avons objectivé un basculement historique du leadership vers l'axe **Chine-Inde**, qui domine désormais la production mondiale tant par son volume que par son influence académique.

Thématiquement, nos travaux révèlent une mutation profonde du domaine : la recherche ne se limite plus à la simple connectivité, mais s'oriente massivement vers l'**AIoT** (Intelligence Artificielle des Objets). L'émergence de l'**Edge Computing**, de la **Blockchain** et de la **Sécurité réseau** démontre que l'infrastructure numérique de demain sera distribuée, intelligente et résiliente.

La réussite de ce projet repose sur une approche méthodologique innovante combinant plusieurs outils de pointe. L'utilisation de **Power BI** a été déterminante pour assurer un traitement ETL de haute qualité et offrir une flexibilité décisionnelle via l'interactivité. La synergie avec **Biblioshiny**, **VOSviewer** et **Gephi** a permis d'apporter une dimension relationnelle et sémantique indispensable à la compréhension des réseaux de savoir.

En conclusion, cette étude démontre que la convergence IoT-5G est entrée dans une phase de maturité opérationnelle. Pour l'ingénieur, la maîtrise de ces outils d'analyse de données constitue un atout majeur pour piloter l'innovation dans un écosystème technologique en perpétuelle mutation. Ce travail pose les bases nécessaires pour anticiper les futurs défis de la **6G**, qui s'annonce déjà comme le prochain grand front de recherche mondiale.

# Bibliographie

I. Lee et K. Lee, The Internet of Things (IoT) : Applications, investments, and challenges for enterprises, *Business Horizons*, vol. 58, no. 4, 2015.

Disponible sur : <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2015.03.008> (Consulté le 25/10/2025).

D. Evans, The Internet of Things : How the Next Evolution of the Internet Is Changing Everything, Cisco IBSG, 2011.

Disponible sur : [https://www.cisco.com/c/dam/en\\_us/about/ac79/docs/innov/IoT\\_IBSG\\_0411FINAL.pdf](https://www.cisco.com/c/dam/en_us/about/ac79/docs/innov/IoT_IBSG_0411FINAL.pdf) (Consulté le 25/10/2025).

M. Agiwal, A. Roy et N. Saxena, Next Generation 5G Wireless Networks : A Comprehensive Survey, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 18, no. 3, 2016.

Disponible sur : <https://doi.org/10.1109/COMST.2016.2532458> (Consulté le 25/10/2025).

A. Gupta et R. Jha, A Survey of 5G Network : Architecture and Emerging Technologies, *IEEE Access*, vol. 3, 2015.

Disponible sur : <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2015.2461602> (Consulté le 25/10/2025).

A. Aria et C. Cuccurullo, Bibliometrix : An R-tool for comprehensive science mapping analysis, *Journal of Informetrics*, vol. 11, no. 4, 2017.

Disponible sur : <https://doi.org/10.1016/j.joi.2017.08.007> (Consulté le 25/10/2025).

N. J. van Eck et L. Waltman, VOSviewer Manual, CWTS, Leiden University, 2022. Disponible sur : <https://www.vosviewer.com/documentation> (Consulté le 25/10/2025).

IEEE Xplore, Advancing Technology for Humanity, [en ligne]. (modifié le 28 Octobre 2025). Disponible sur : <https://ieeexplore.ieee.org/Xplore/home.jsp> (Consulté le 25/10/2025).

IEEE Xplore, Advancing technology for humanity, [en ligne]. (modifié le 28 Octobre 2025). Disponible sur : <https://ieeexplore.ieee.org/Xplore/home.jsp> (Consulté le 10/10/2025).

Springer Nature, Software survey : VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping, [en ligne].

Disponible sur : <https://link.springer.com/article/10.1007/s11192-009-0146-3> (Consulté le 10/10/2025).

N. J. Van Eck et L. Waltman, Manual VOSviewer version 1.6.18 [en ligne]. Leiden : Centre for Science and Technology Studies (CWTS), Leiden University, 2022, 50 p.

Disponible sur : [https://www.vosviewer.com/documentation/Manual\\_VOSviewer\\_1.6.18.pdf](https://www.vosviewer.com/documentation/Manual_VOSviewer_1.6.18.pdf) (Consulté le 11/10/2025).

NCBI, A bibliometric analysis using VOSviewer of publications on COVID-19, [en ligne]. Disponible sur : <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7396244/> (Consulté le 15/10/2025).

M. N. I. Farooqui, J. Arshad et M. M. Khan, A bibliometric approach to quantitatively assess current research trends in 5G security. In : Library Hi Tech. Vol. 39, no 5. Bingley : Emerald Publishing, 2021, 18 p.

Disponible sur : <https://www.researchgate.net/publication/353690628> (Consulté le 26 octobre 2025).

S. Mendonça, The rise of 5G technologies and systems. In : Telecommunications Policy. Vol. 46, no 3. Amsterdam : Elsevier, 2022, 15 p.

Disponible sur : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308596122000301> (Consulté le 26 octobre 2025).

A. I. Zreikat, Z. Alarnaout, A. Abadleh, E. Elbasi et N. Mostafa, The Integration of the Internet of Things (IoT) Applications into 5G Networks : A Review and Analysis. In : Computers. Vol. 14, no 7. Bâle : MDPI, 2025, 12 p.

Disponible sur : <https://www.mdpi.com/2073-431X/14/7/250> (Consulté le 26 octobre 2025).

Bibliometrix, BIBLIOMETRIX, Disponible sur : <https://www.bibliometrix.org/home/> [en ligne] (Consulté le 15 octobre 2025).

Gephi Consortium, Gephi Open-source project for visual network analysis , Disponible sur : <https://gephi.org/> [en ligne] (Consulté le 13 octobre 2025).