

L'Intelligence Artificielle (IA) au cœur de la transition énergétique : Vers des réseaux électriques intelligents et durables au Maroc

Artificial Intelligence (AI) for energy transition : Towards intelligent and sustainable electrical infrastructures in Morocco

Nissrine MAJIT, (Doctorante)

Ecole des Sciences de l'Information, Rabat, Maroc

Naila AMROUS, (Enseignante-Chercheuse)

Ecole des Sciences de l'Information, Rabat, Maroc

Adresse de correspondance :	Ecole des Sciences de l'Information Avenue Allal Al Fassi, Rabat Rabat, Maroc 05377-74904
Déclaration de divulgation :	Les auteurs n'ont pas connaissance de quelconque financement qui pourrait affecter l'objectivité de cette étude et ils sont responsables de tout plagiat dans cet article.
Conflit d'intérêts :	Les auteurs ne signalent aucun conflit d'intérêts.
Citer cet article	MAJIT, N., & AMROUS, N. (2024). L'Intelligence Artificielle (IA) au cœur de la transition énergétique : Vers des réseaux électriques intelligents et durables au Maroc. <i>International Journal of Accounting, Finance, Auditing, Management and Economics</i> , 5(8), 219-242. https://doi.org/10.5281/zenodo.13328616
Licence	Cet article est publié en open Access sous licence CC BY-NC-ND

Received: July 01, 2024

Accepted: August 12, 2024

International Journal of Accounting, Finance, Auditing, Management and Economics - IJAFAME

ISSN: 2658-8455

Volume 5, Issue 8 (2024)

L'Intelligence Artificielle (IA) au cœur de la transition énergétique : Vers des réseaux électriques intelligents et durables au Maroc

Résumé :

Le projet Advanced Metering Infrastructure (AMI), initié par l'Office National de l'Électricité et de l'Eau potable (ONEE) en 2016, vise à moderniser le réseau électrique marocain en déployant des compteurs intelligents. L'intégration de l'intelligence artificielle (IA) dans ce projet présente un fort potentiel pour optimiser la gestion du réseau, intégrer les énergies renouvelables, améliorer l'efficacité énergétique, créer de nouveaux emplois et services et réduire l'empreinte carbone nationale. Cependant, cette intégration soulève des défis majeurs qui pourraient compromettre sa réussite.

Cette étude examine les pratiques d'IA mises en œuvre dans le site pilote AMI de Casablanca. Elle évalue le niveau de maturité de l'IA et l'engagement de l'ONEE envers son intégration et formule des recommandations concrètes pour moderniser le réseau électrique national en exploitant le potentiel de l'IA.

La méthodologie adoptée combine une analyse documentaire avec des entretiens semi-directifs menés auprès des responsables de l'ONEE. Les résultats révèlent une maîtrise significative de l'IA chez les responsables et un engagement élevé envers son intégration. Parallèlement, l'étude met en lumière des défis réglementaires, éthiques, technologiques, économiques, sociaux et environnementaux.

Bien que limitée au site pilote de Casablanca et aux perspectives des responsables de l'ONEE, cette étude offre des insights précieux sur le potentiel de l'IA dans la modernisation des infrastructures électriques marocaines. Elle propose des recommandations concrètes pour une intégration responsable et réussie de l'IA dans le secteur énergétique marocain et souligne la nécessité de mener des recherches interdisciplinaires pour approfondir la compréhension des enjeux et des opportunités liés à l'IA dans l'accélération de la transition énergétique.

Mots clés : Intelligence Artificielle (IA), Transition énergétique, Développement durable, Compteurs intelligents, Efficacité énergétique.

JEL Classification : M14, Q01, G30

Type du papier : Recherche empirique

Abstract:

The Advanced Metering Infrastructure (AMI) project, launched by the National Office of Electricity and Potable Water (ONEE) in 2016, aims to modernize the Moroccan electrical grid through the deployment of smart meters. The integration of artificial intelligence (AI) promises to optimize grid management, integrate renewables, improve energy efficiency and reduce national energy consumption, but this integration raises major challenges that could compromise its success.

This study examines the AI practices implemented in the Casablanca AMI pilot site. It assesses the level of AI maturity and ONEE's commitment to its integration. It also proposes concrete recommendations for modernizing the national electricity Grid by using the potential of responsible and sustainable AI.

Our methodological approach combines a literature review and semi-structured interviews with ONEE leaders. The results reveal a significant mastery of AI and a high level of commitment to its integration. The study highlights regulatory, ethical, technological, economic, social, and environmental challenges.

While limited to the Casablanca pilot site and the perspectives of ONEE leaders, this study provides valuable insights into the potential of AI in modernizing Morocco's electricity infrastructure. It offers concrete recommendations for the responsible and successful integration of AI into Morocco's energy sector and highlights the need for interdisciplinary research to deepen our understanding of the challenges and opportunities of AI in accelerating the energy transition in Morocco.

Keywords: Artificial Intelligence (AI), Energy Transition, Sustainable Development, Smart Meters, Energy Efficiency.

JEL Classification: M14, Q01, G30

Paper type: Empirical Research

1 Introduction

Face à la dépendance énergétique avoisinant 94% en 2020 (IEA, 2021) et aux défis environnementaux, le Maroc s'est engagé depuis 2009 dans une transition énergétique durable.

Cette initiative ambitieuse vise à renforcer la part des énergies renouvelables dans le mix énergétique national, à promouvoir l'efficacité énergétique et à réduire les émissions de gaz à effet de serre. Dans ce contexte, l'Office National de l'Électricité et de l'Eau Potable (ONEE) a lancé en 2016 le projet AMI (Advanced Metering Infrastructure) qui vise à moderniser le réseau électrique national grâce au déploiement de 4,4 millions de compteurs intelligents à l'horizon 2026 (ONEE, 2016).

Le déploiement de l'intelligence artificielle (IA) dans le projet AMI offre des opportunités prometteuses, telles que l'optimisation de la gestion du réseau, une meilleure intégration des énergies renouvelables dans le mix global, l'amélioration de l'efficacité énergétique et la réduction des coûts (Ahmad et al., 2021). Cependant, cette intégration soulève également des défis réglementaires, éthiques, technologiques, économiques, sociaux et environnementaux (Chen et al., 2021), qui pourraient compromettre la réussite du projet.

C'est dans ce contexte que notre question de recherche émerge : Comment une approche responsable et éthique de l'IA peut-elle améliorer la compréhension des défis et des opportunités liés à la modernisation des infrastructures électriques au Maroc, tout en soutenant le développement de solutions IA innovantes et inclusives pour accélérer la transition énergétique durable ?

Ce travail de recherche vise à étudier l'état actuel des pratiques d'IA mises en œuvre dans le cadre du projet pilote AMI au Maroc. Il évalue le niveau de maturité de l'IA et l'expertise des responsables impliqués dans le projet. Il analyse également l'étendue de l'engagement de l'ONEE envers l'intégration de pratiques de l'IA. Enfin, il formule des recommandations concrètes pour accompagner l'intégration d'une IA responsable et éthique au sein de l'ONEE afin de soutenir le projet AMI et tirer pleinement parti du potentiel de l'IA dans l'accélération de la transition énergétique durable au Maroc.

Notre article est structuré en quatre sections distinctes, chacune apportant un éclairage spécifique à notre étude. Dans un premier temps, la revue de la littérature offre un panorama général du cadre conceptuel et théorique en définissant les notions essentielles telles que l'IA, la transition énergétique, le développement durable, ainsi que les réseaux et compteurs intelligents. Ensuite, la section consacrée à la méthodologie de recherche détaille les approches et les outils employés pour la collecte et l'analyse des données. Par la suite, nous présentons nos résultats de recherche en mettant en lumière l'évaluation du niveau de maturité de l'IA chez les responsables de l'ONEE et leur engagement envers son intégration éthique et responsable. In fine, la section discussion et conclusion synthétisent les principaux constats, abordent les différents défis identifiés et proposent ensuite des recommandations concrètes pour optimiser l'intégration de l'IA dans le développement des infrastructures électriques et accélérer la transition énergétique au Maroc. Cette dernière partie examine également les limites de notre étude, ses implications pratiques et ouvre la voie à de futures recherches dans ce domaine en constante évolution.

2 Revue conceptuelle et état des lieux

2.1 Revue conceptuelle

2.1.1 Genèse et évolution de l'Intelligence Artificielle (IA)

L'intelligence artificielle (IA), définie par l'Organisation de Coopération et de Développement Économiques (OCDE) comme "un ensemble de techniques permettant aux machines de simuler l'intelligence humaine" (OCDE, 2024, p. 22), s'est imposée comme une technologie

transformative à l'échelle mondiale. Fondée sur l'informatique, les mathématiques et les statistiques, l'IA exerce une influence croissante sur nos modes de vie et offre des perspectives prometteuses pour relever des défis mondiaux comme le changement climatique (OCDE, 2024, p 28).

Bien que ses origines remontent aux années 1950-1960, l'IA n'a connu de progrès significatifs que durant les deux dernières décennies. Son évolution a été marquée par plusieurs étapes clés : l'émergence des systèmes experts dans les années 1980, l'avènement de l'apprentissage automatique dans les années 1990 et le développement du Deep Learning dans les années 2000 (Jumel & Mallet, 2023). Une avancée majeure est survenue en 2014 avec l'invention des réseaux antagonistes génératifs (GAN) par Ian Goodfellow, expert en informatique et en IA. Cette innovation a donné naissance à l'IA générative, capable de créer de nouveaux contenus à partir de données limitées, ouvrant ainsi de nouvelles perspectives, mais soulevant également des questions éthiques et sociales complexes (Bengrich & Abdou, 2022)

2.1.2 Transition énergétique et développement durable

Apparue dans les années 1970 à la suite des chocs pétroliers, la transition énergétique est définie par l'Organisation des Nations Unies (ONU) comme « le processus de passage d'un système énergétique basé sur les combustibles fossiles à un système basé sur les énergies renouvelables et l'efficacité énergétique » (ONU, 2015, p 23).

Avec la prise de conscience des impacts environnementaux des énergies fossiles, le concept de la transition énergétique s'est aligné étroitement avec le concept de développement durable pour concilier les impératifs économiques, sociaux et environnementaux, comme souligné sur le rapport Brundtland en 1987 (ONU, 2015).

L'Accord de Paris sur le climat (2015) et le Programme de développement durable des Nations Unies à l'horizon 2030, définissant 17 Objectifs de Développement Durable (ODD), ont renforcé cette synergie entre la transition énergétique et le développement durable (Degron, 2023) car ces initiatives internationales visent à guider les nations vers une durabilité environnementale, économique et sociale

Cette synergie entre les deux concepts a été renforcée par l'Accord de Paris sur le climat en 2015 et par le programme de développement durable des Nations Unies à l'horizon 2030 qui a défini 17 objectifs (ODD) qui ambitionnent de guider les pays vers la durabilité environnementale, économique et sociale (Milán-García et al., 2019).

En 2017, l'Agence Internationale de l'Energie (AIE) a proposé une définition holistique de la transition énergétique, la décrivant comme « une transformation structurelle du système énergétique mondial visant à atteindre les objectifs de développement durable » (AIE, 2017, p. 31).

L'avènement du numérique et de l'intelligence artificielle (IA) a donné naissance à la transition énergétique 4.0, une nouvelle génération qui fusionne la transition énergétique traditionnelle, les objectifs de développement durable et la transformation numérique (Lee & Yang, 2019).

Cette évolution vise le déploiement d'infrastructures énergétiques intelligentes intégrant des technologies de pointe issues de l'IA pour optimiser la gestion de l'offre et de la demande d'énergie, tout en réduisant les émissions de gaz à effet de serre. En outre, la transition énergétique 4.0 contribue simultanément à plusieurs Objectifs de Développement Durables (ODD), notamment l'objectif numéro 7 relatif au droit d'accès universel à des services énergétiques fiables, modernes et propres, l'objectif numéro 13 concernant la lutte contre les changements climatiques et enfin l'objectif numéro 9 qui promeut les Infrastructures résilientes et l'industrialisation durable et cela dans l'objectif ultime d'atteindre un avenir énergétique innovant, résilient et durable (ONU, 2015).

L'Accord de Paris sur le climat (2015) et le Programme de Développement Durable des Nations Unies à l'horizon 2030 qui définit 17 Objectifs de Développement Durable (ODD), ont

considérablement renforcé la synergie entre la transition énergétique et le développement durable (Degron, 2023). Ces initiatives internationales visent à guider les nations vers une durabilité environnementale, économique et sociale, notamment à travers l'objectif numéro 7 relatif au droit d'accès universel à des services énergétiques fiables, modernes et propres et l'objectif numéro 13 concernant les mesures relatives à la lutte contre les changements climatiques particulièrement pertinents pour la transition énergétique (Milán-García et al., 2019).

En 2017, l'Agence Internationale de l'Energie (AIE) a proposé une définition holistique de la transition énergétique, la décrivant comme « une transformation structurelle du système énergétique mondial visant à atteindre les objectifs de développement durable » (AIE, 2017, p. 31). Cette conception a évolué avec l'avènement du numérique et de l'intelligence artificielle (IA), donnant naissance à la transition énergétique 4.0, une nouvelle génération qui fusionne la transition énergétique traditionnelle, les objectifs de développement durable et la transformation numérique (Lee & Yang, 2019).

Cette évolution vise le déploiement d'infrastructures énergétiques intelligentes intégrant des technologies de pointe issues de l'IA pour optimiser la gestion de l'offre et de la demande d'énergie, tout en réduisant les émissions de gaz à effet de serre. La transition énergétique 4.0 s'aligne non seulement sur les ODD 7 et 13 mentionnés précédemment, mais contribue également à l'objectif numéro 9 qui promeut les infrastructures résilientes et l'industrialisation durable. Cette approche holistique souligne l'importance des innovations technologiques dans la réalisation d'un avenir énergétique résilient et durable (ONU, 2015).

Ayant établi le contexte global de la transition énergétique et sa relation avec l'IA, il convient maintenant d'approfondir quelques théories économiques qui sous-tendent la transition énergétique et d'examiner certains travaux antérieurs pertinents.

2.1.3 Grandes théories économiques sous-tendant la transition énergétique

L'économie de l'énergie, domaine d'étude crucial dans le contexte de la transition énergétique et de l'utilisation des réseaux intelligents, s'est enrichie au fil du temps de théories fondamentales qui éclairent les enjeux et les défis de ce secteur. En retraçant l'évolution de ces théories, on peut observer une interaction croissante entre l'économie, l'environnement et les innovations technologiques, notamment l'intelligence artificielle (IA), qui jouent un rôle moteur dans la transformation du système énergétique pour faire face aux défis climatiques et accélérer la transition énergétique.

2.1.3.1 Théorie des externalités

Selon La théorie des externalités perçue comme une théorie fondamentale dans l'économie de l'énergie, la production et la consommation d'énergie génèrent des externalités, c'est-à-dire des effets sur des tiers non pris en compte par les prix de marché. Les externalités négatives, comme la pollution atmosphérique ou le changement climatique, entraînent des coûts non supportés par les producteurs ou les consommateurs d'énergie (Percebois, 2001). Les externalités positives, comme la recherche et le développement de technologies énergétiques propres, peuvent alors générer des bénéfices. Selon ce fondement théorique, l'intégration des réseaux intelligents dans le système énergétique peut contribuer à internaliser les externalités dans le système énergétique qui en permet une meilleure gestion de la demande et de l'offre d'énergie, favorisant une réduction de la consommation et des émissions de gaz à effet de serre. De plus, ils facilitent l'intégration des énergies renouvelables, sources d'énergie moins polluantes que les combustibles fossiles (Percebois, 2018).

2.1.3.2 Théorie de Pareto

La théorie de Pareto, également connue sous le nom de loi des 80/20 stipule que 80% des effets proviennent de 20% des causes (Ibid.). Appliquée à l'économie de l'énergie, cette théorie suggère

que l'optimisation des efforts de transition énergétique devrait se concentrer sur les actions les plus efficaces pour réduire la consommation d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre. En identifiant les 20% des facteurs qui contribuent le plus à la consommation d'énergie inefficace, les décideurs politiques et les acteurs économiques peuvent cibler leurs interventions de manière stratégique. L'efficacité énergétique des bâtiments, l'optimisation des processus industriels et l'adoption de modes de transport durables sont des exemples d'actions qui pourraient s'inscrire dans cette approche.

2.1.3.3 Théorie de l'efficacité énergétique

La théorie de l'efficacité énergétique vise à réduire la consommation d'énergie tout en maintenant un niveau de service égal ou supérieur. Cette théorie a pris une importance croissante face à l'augmentation de la demande énergétique et aux préoccupations environnementales en encourageant l'adoption d'appareils plus efficaces dans le but de réduire la consommation d'énergie ainsi que les émissions de gaz à effet de serre (Carbonnier & Grinevald, 2011).

2.1.3.4 Théorie de l'économie écologique

La théorie de l'économie écologique met l'accent sur l'interdépendance entre l'économie et l'environnement. Cette approche considère que l'économie est un sous-système de l'environnement et que les activités économiques doivent être menées de manière durable, en préservant les ressources naturelles et en limitant les impacts environnementaux (He, 2010). Dans le contexte de la transition énergétique, la théorie de l'économie écologique souligne la nécessité de prendre en compte l'ensemble des coûts et des bénéfices environnementaux des choix énergétiques. L'évaluation du cycle de vie des technologies énergétiques, depuis l'extraction des ressources jusqu'à la gestion des déchets, devient ainsi un élément crucial pour une prise de décision éclairée et durable (ibid.).

2.1.3.5 Théorie de la concurrence

La théorie de la concurrence met en avant l'importance de la concurrence dans les marchés de l'énergie pour garantir l'efficacité et l'innovation. Cette théorie s'applique particulièrement au secteur de l'électricité, où la libéralisation des marchés a permis l'entrée de nouveaux acteurs et la diversification des sources d'approvisionnement (Keppler, 2004). Dans notre contexte actuel, selon cette théorie l'introduction de l'intelligence artificielle dans les réseaux intelligents peut contribuer à renforcer la transparence des marchés de l'énergie, optimiser l'allocation des ressources en fonction de la demande en temps réel, permettant aux producteurs d'énergie d'être mieux intégrés au réseau et de mieux se positionner dans les marchés internationaux de l'énergie (Panek et al., 2023).

2.1.3.6 Théorie des jeux

La théorie des jeux peut être appliquée pour analyser les interactions stratégiques entre les divers acteurs impliqués dans la transition énergétique, telles que les producteurs d'énergie, les consommateurs, les gouvernements et les entreprises technologiques. Elle permet de comprendre comment les décisions sont prises dans des situations où le gain d'un acteur dépend des actions des autres (Wolbring, 2020). Cette théorie est particulièrement utile pour concevoir des mécanismes d'incitation qui encouragent les consommateurs d'énergie à adopter des comportements favorables à la transition énergétique (ibid.).

2.1.3.7 L'économie circulaire

L'économie circulaire est un modèle économique qui vise à minimiser le gaspillage et à maximiser l'utilisation des ressources tout au long de leur cycle de vie. Il favorise la réutilisation, le recyclage et la valorisation des matériaux. Dans le contexte de la transition énergétique, ce modèle encourage l'intégration de l'énergie issue de la biomasse et soutient les pratiques de

consommation durables renforçant ainsi la durabilité du système énergétique global (Bourdin & Maillefert, 2020).

2.1.4 Études antérieures

Pour mieux comprendre les enjeux de la transition énergétique liés à la modernisation des réseaux électriques, il est essentiel d'examiner des travaux antérieurs pertinents pour explorer les dynamiques des réseaux intelligents et leur impact économique, en particulier à travers les expériences de la France et de l'Allemagne. Ces deux pays, étroitement liés au Maroc en matière d'énergie, ont été choisis pour plusieurs raisons. Deux concessionnaires de distribution électrique au Maroc, LIDEC et REDAL, sont des sociétés françaises, ce qui souligne l'influence française dans le secteur énergétique marocain. Par ailleurs, l'Allemagne est un partenaire clé du Maroc dans le cadre de la transition énergétique, collaborant depuis 2009 à travers l'Agence allemande de coopération internationale (GIZ) sur des projets solaires et éoliens, et depuis 2023, sur le projet d'hydrogène vert.

2.1.4.1 L'étude : Renouvelables et réseaux électriques en France et en Allemagne

Établie par quatre académies nationales (Akademie der Wissenschaften Leopoldina, acatech, Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, Académie des sciences et Académie des technologies) en 2015, cette étude comparative vise à analyser les approches adoptées par la France et l'Allemagne dans le déploiement des énergies renouvelables et l'optimisation des réseaux électriques. Elle met en avant les meilleures pratiques et les leçons tirées, notamment en matière d'intégration de l'IA pour améliorer l'efficacité énergétique et la gestion des ressources. De plus, l'étude aborde les défis liés à l'énergie nucléaire dans les deux pays, la problématique de l'acceptabilité sociale des énergies renouvelables, ainsi que les enjeux de tarification et les risques météorologiques associés aux sources d'énergie renouvelable. Les auteurs soulignent également l'importance d'une interconnexion énergétique au niveau européen et la nécessité d'établir un cadre juridique clair pour favoriser cette interconnexion continentale, permettant ainsi d'aboutir à un système énergétique européen intégré et flexible (Académie des sciences et al., 2015).

2.1.4.2 Études de l'Ifri : La dimension stratégique de la transition énergétique. Défis et réponses pour la France, l'Allemagne et l'Union européenne

L'étude de Jifri de 2019 explore comment les stratégies de transformation énergétique peuvent être renforcées par l'adoption de technologies avancées, notamment l'intelligence artificielle (IA), en se concentrant sur les expériences des pays de l'union européenne notamment la France et de l'Allemagne. Elle vise à identifier les facteurs clés de succès pour l'intégration de l'IA dans les projets énergétiques en analysant divers aspects, tels que les technologies avancées, la gouvernance et la gestion des ressources. L'étude examine également les implications socio-économiques de l'intégration de l'IA, notamment sur l'emploi, la formation des travailleurs et les dynamiques économiques. Elle souligne également des défis liés à l'inclusion sociale et à l'équité énergétique en Europe (Eyl-Mazzega, 2019).

2.1.5 Réseaux électriques intelligents (Smart grids)

les réseaux électriques intelligents, communément appelés « Smart Grids », émergent comme une solution innovante et prometteuse dans la gestion de l'énergie (Zhou et al., 2021). Selon la Commission de Régulation de l'Énergie (CRE), ces infrastructures énergétiques modernes intègrent des technologies de l'information et de la communication avancées pour optimiser la production, le transport et la distributions de l'électricité de manière plus efficace, flexible, économe et durable (CRE, 2019). Ces Smart Grids jouent un rôle crucial dans l'assemblage et la gestion des énergies provenant de diverses sources. Un réseau intelligent type intègre et

coordonne des sources d'énergie traditionnelles (comme les centrales thermiques ou nucléaires) avec des sources renouvelables telles que l'éolien, le solaire ou l'hydraulique.

Contrairement aux réseaux électriques traditionnels passifs et centralisés (Liu et al., 2021), les Smart Grids, selon la CRE, permettent :

- L'automatisation de la gestion du réseau
- L'intégration décentralisée des énergies renouvelables intermittentes
- L'ajustement dynamique de la demande à l'offre disponible
- L'implication active des consommateurs,
- La réduction des coûts économiques et des impacts environnementaux

Le tableau suivant résume les différences clés entre les réseaux traditionnels et les SG :

Tableau 1 : Différences clés entre les réseaux électriques traditionnels et les Smart Grids

Réseaux électriques traditionnels	Réseaux électriques intelligents (Smart Grids)
Analogiques	Numériques
Flux d'énergie unidirectionnel	Flux d'énergie bidirectionnel
Production centralisée	Production décentralisée
Communication sur une partie des réseaux	Communication sur l'ensemble des réseaux
Gestion de l'équilibre du système énergétique par (offre/production)	Gestion de l'équilibre du système énergétique par (demande/consommation)
Passif (consommateur)	Actif (consom'acteur)

Source : <https://www.smartgrids-cre.fr/introduction-aux-smart-grids>

2.1.6 Compteurs intelligents (Smart Meters)

Les compteurs intelligents, également connus sous le nom de compteurs communicants, jouent un rôle crucial dans la modernisation des infrastructures électriques (smart grids). Selon l'Agence Internationale de l'Énergie, ces dispositifs de mesure électrique offrent une précision accrue du comptage électrique et facilitent une communication interactive entre l'opérateur et le consommateur d'énergie (AIE, 2021).

L'intégration de l'intelligence artificielle (IA) dans le traitement des données énergétiques permet aux compteurs intelligents d'offrir plusieurs avantages tant aux consommateurs qu'aux opérateurs (Tiss et Orellano 2023), identifiés comme suit :

- Amélioration de l'efficacité énergétique ;
- Réduction des coûts durant les périodes de pointe ;
- Amélioration de la fiabilité du réseau par la détection des pannes ;
- Développement de nouveaux services innovants, etc.

Pour répondre à la diversité des besoins des consommateurs, les compteurs intelligents se déclinent en différentes catégories, chacune présentant des fonctionnalités et des modes de facturation spécifiques (Jumel & Mallet, 2023). Le tableau 2 ci-dessous présente les principales typologies de compteurs intelligents.

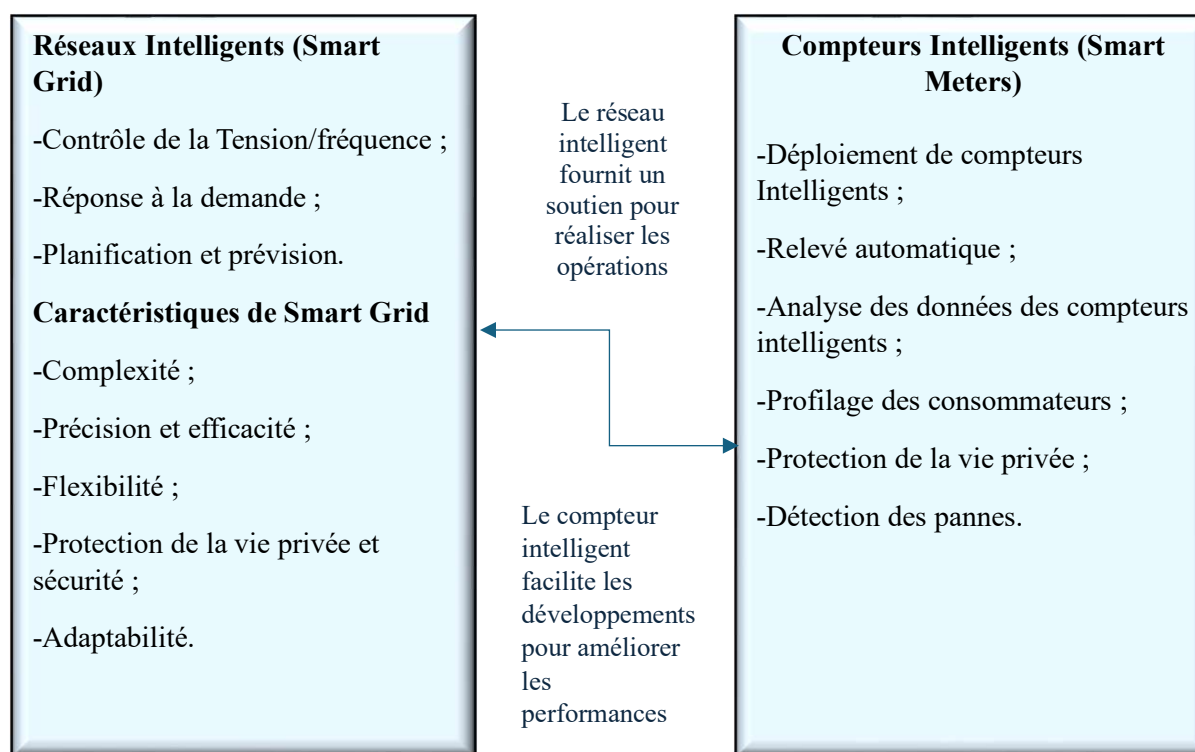
Il convient de souligner que dans le domaine des systèmes énergétiques modernes, la relation entre les réseaux intelligents (smart grids) et les compteurs intelligents (smart meters) est une relation très étroite qui au-delà d'une simple connexion. Les compteurs intelligents constituent un socle technique pour les réseaux intelligents. Ils recueillent des données en temps réel sur la consommation d'électricité et les relaient au réseau intelligent. En retour, dotés de cet afflux de données, les réseaux intelligents se lancent dans une analyse avancée des données, optimisant ainsi la gestion de l'énergie sur le réseau tout en amplifiant les capacités et l'efficacité des compteurs eux-mêmes (Zhu et al., 2022). Cette interaction complexe entre les réseaux intelligents et les compteurs intelligents favorise un écosystème énergétique résilient, efficace et stable comme décrit sur la figure 3 ci-dessous.

Tableau 2 Typologies des compteurs intelligents BT

Types des compteurs intelligents	Propriétés
Compteurs à pré-paiement	- Facturation et paiement de l'électricité avant la consommation ; - Visibilité meilleure et contrôle préalable des dépenses énergétiques ; - Réduction maximale des factures impayées.
Compteurs à post-paiement	Facturation traditionnelle de la consommation après utilisation (généralement mensuelle ou bimestrielle) ;
Compteurs gérés à distance (télé-relève)	- Transmission automatique des données de la consommation à l'opérateur ; - Relève automatique et à distance, sans intervention manuelle ; - Suivi d'une facturation précise à distance.
Compteurs de Gestion de la demande	- Contrôle bidirectionnel pour ajuster la consommation en temps réel ; - Modulation en fonction des tarifs, de la demande globale et de l'offre disponible ; - Fonctionnalités de communication très avancées.

Source : <https://www.rte-france.com/>

Figure 1 : Smart Grids et Compteurs Intelligents : Applications et Relation



Source : <https://www.smartgrids-cre.fr/introduction-aux-smart-grids>

2.1.7 Normes et modèles d'évaluation de la maturité de l'IA dans les organisations

La maturité digitale en intelligence artificielle (IA), ou maturité d'IA, est un concept récent qui évolue dans le cadre plus large de la transformation digitale. Bien qu'il n'existe pas de définition unanime, ce concept gagne de plus en plus en importance dans le monde des technologies de l'information (IT) et de l'entrepreneuriat (Grooss et al., 2022). Pour tirer pleinement parti de l'IA et améliorer leurs niveau de maturité, les organisations doivent considérer cinq dimensions clés à savoir :

- La stratégie digitale et les processus métier ;
- La technologie : infrastructures matérielles et logicielles ;

- La culture de l'entreprise ;
- Les compétences ;
- La gouvernance des données.

L'évaluation de la maturité d'IA au sein d'une organisation consiste à analyser comment ces technologies sont intégrées et maîtrisées dans ces cinq dimensions (Vial, 2019). Ce processus permet d'identifier les forces et les faiblesses de l'organisation en matière d'IA et d'établir une stratégie d'intégration d'IA alignée sur ses objectifs business. Plusieurs modèles et normes, s'appuyant sur des indicateurs clés de performance (KPI) spécifiques, permettent d'évaluer cette maturité. Le tableau suivant récapitule les principales normes et modèles d'évaluation :

Tableau 3: Récapitulatif des principales normes et modèles d'évaluation de la maturité de l'IA

Norme ou modèle	Niveau/Dimension de l'IA	Quelques KPI
Norme ISO/IEC 38507 :2022	-Ad hoc (immédiat) -Exploratoire -En développement -Géré -Optimisé	-Nombre des projets pilotes -Technologies IA utilisées -Intégration IA aux processus métier -Compétences des employés en IA -ROI des initiatives IA déployées
Modèle de maturité IA de Gartner	-Inexistant -Naissant -Emergent -En développement -Avancé	-Cas d'utilisation potentiels d'IA -Compétences des employés en IA -Prototypes d'IA en développement
Modèle de McKinsey & Company	-Dimension stratégie -Dimension technologie -Dimension compétences -Dimension données -Dimension opérations	- Technologies IA utilisées - Compétences IA des employés - Qualité/quantité des données issues d'IA - Intégration de l'IA aux processus métier
Modèle de Capgemini	-Exploration (faible) -Expérimentation (pilote) -Déploiement (moyen) -Maîtrise (élevé) -Leadership (avancé)	-Connaissance de l'IA - Prototypes développés - Solutions déployées - Automatisation des tâches - Impact culturel et organisationnel

Source : Auteurs

Ces modèles varient dans leur approche, allant de l'évaluation par niveaux (comme la norme ISO/IEC 38507 : 2022 et le modèle de Gartner) à l'analyse par dimensions (modèle de McKinsey & Company) ou par stades de développement (modèle de Capgemini). Chacun utilise des KPI spécifiques pour mesurer divers aspects de l'intégration de l'IA, tels que le nombre de projets pilotes, les technologies utilisées, les compétences des employés, et l'impact sur les processus métier.

Le choix du modèle ou de la norme dépend des besoins spécifiques et du budget de l'organisation. Les résultats de cette évaluation permettent d'identifier les domaines d'amélioration, de renforcer l'engagement envers une utilisation plus avancée de l'IA et d'améliorer les performances globales de l'organisation.

2.2 Etat des lieux : Contexte et diagnostic des pratiques de l'IA dans le projet AMI

2.2.1 Contexte de recherche

Le projet Advanced Metering Infrastructure (AMI), lancé par l'Office National de l'Électricité et de l'Eau Potable (ONEE) en 2016 avec un financement de 200 millions de dollars de la Banque Mondiale, représente un progrès majeur dans la modernisation du réseau électrique au Maroc. Son objectif principal est d'optimiser la gestion du réseau, promouvoir l'efficacité énergétique et accélérer la transition énergétique au pays.

Dans le cadre de ce projet, trois types de compteurs intelligents sont déployés : deux modèles pour le prépaiement et le post-paiement destinés aux clients basse tension (BT), ainsi qu'un

modèle multifonctions (télé-relève) dédié aux clients moyenne et haute tension. Le déploiement suit une feuille de route priorisant les zones à forte consommation, visant à couvrir l'ensemble du territoire national d'ici fin 2026.

Le déploiement des compteurs intelligents dans le cadre du projet AMI s'est déroulé selon une planification structurée en plusieurs phases :

- Phase pilote (2016) : Installation de 10 000 compteurs intelligents post-paiement pour des fins de test technologique.
- Début du déploiement à grande échelle (2018) : Déploiement de plus de 600 000 compteurs intelligents bi-horaire.
- Phase d'accélération (2019-2022) : Installation de 140 000 compteurs intelligents pré-paiement et de 250 000 compteurs post-paiement

D'ici fin 2026, l'ONEE a prévu de généraliser les compteurs intelligents multifonctions (également appelés compteurs communicants) sur l'ensemble du territoire marocain. Cette nouvelle génération de compteurs présente de nombreuses fonctionnalités et divers avantages notamment :

- Collecte automatisée des données de consommation grâce à la Télé-relève et télé-opération à distance ;
- Détection et localisation des pannes et coupures d'électricité pour une meilleure gestion du réseau ;
- Gestion intelligente de la demande en électricité en incitant les consommateurs à adapter leurs usages aux besoins du réseau ;
- Détection des fraudes et des anomalies de consommation pour réduire les pertes non techniques ;
- Accès des clients aux informations détaillées sur leur consommation via un portail web et une application mobile pour les sensibiliser aux économies d'énergie ;
- Suivi de la consommation en temps réel par les clients pour mieux maîtriser leurs factures ;
- Intégration des données des compteurs dans un système d'information géographique (SIG) pour une gestion optimisée du réseau de distribution ;
- Mise en place de tarifications dynamiques incitant les consommateurs à moduler leur consommation en fonction des prix et des besoins du réseau.

Pour garantir la cybersécurité et la protection des données de ses clients, tout en assurant une gestion efficace du réseau électrique, l'ONEE applique les norme ISO 27001 relative à la gestion et à la sécurité de l'information, la norme ISO/IEC 38507-2022 relative à la gouvernance de l'utilisation de l'intelligence artificielle. Il utilise également le protocole BSI pour le chiffrement des données, installe des pare-feu et applique les recommandations de la Commission Nationale de Contrôle de la Protection des Données Personnelles (CNDP).

2.2.2 Diagnostic des pratiques de l'IA dans le cadre du projet AMI

Pour faire un diagnostic précis des pratiques d'intelligence artificielle (IA) mises en œuvre dans le projet AMI, nous avons divisé les applications en deux phases distinctes :

2.2.2.1 Phase 1 : Applications déployées (2016-2022)

Cette phase a vu le déploiement d'applications d'IA matures et éprouvées par l'ONEE, apportant des bénéfices concrets à l'office. Le tableau suivant résume les principales applications, les technologies employées et leurs impacts quantifiés.

Tableau 4 : Applications de l'IA dans le projet AM (2018-2022)

Domaine d'application	Technologies IA	Impact quantifié
Analyse prédictive et précision de la consommation électrique	-Machine Learning - Analyse des données massives -Modélisation - Deep Learning	-Optimisation de la gestion de la demande de 10 à 15% -Réduction des pertes d'énergie d'environ 8% -Réduction des erreurs de prévision de 15% et 20% -Meilleure anticipation des pics de consommation
Profilage et segmentation des consommateurs ;	-Machine Learning -Analyse de données massives, -Modélisation	-Offres personnalisées et campagnes marketing ciblées pour le segment social (ex. déploiement des compteurs pré-payés 100 DHS/mois)
Optimisation de la gestion du réseau : Précision, fiabilité, sécurité, maintenance et la lutte contre la fraude.	-Machine Learning -Analyse de données massives -Modélisation -Deep Learning -Pilotage automatique	-Amélioration de la précision de la facturation de près de 53% -Amélioration de la sécurité et la fiabilité du réseau d'environ 85% -Réduction des coûts de maintenance de près de 12% -Réduction des pertes dues à la fraude d'environ 15%

Source : Auteurs

2.2.2.2 Phase 2 : Applications en phase d'expérimentation CSTE de l'ONEE

La phase 2 du projet AMI vise à explorer le potentiel des technologies d'IA de pointe actuellement testées au laboratoire du Centre des Sciences et Techniques de l'Électricité (CSTE) de l'ONEE à Casablanca. Motivée par l'objectif d'identifier des solutions d'IA à fort potentiel pour une intégration transparente au projet AMI, cette phase vise à renforcer ses capacités et ouvrir la voie à une modernisation réussie de l'infrastructure électrique marocaine.

Actuellement, le CSTE expérimente plusieurs applications d'IA prometteuses, dont :

- ***L'optimisation de la production énergétique***

Grace au Machine Learning et au Deep Learning, il est possible de gérer en temps réel la production intermittente des énergies renouvelables, en s'adaptant à la demande et aux conditions climatiques. Cette gestion intelligente des énergies renouvelables permet de réduire la dépendance en énergie fossile et de la facture énergétique nationale.

- ***La maintenance prédictive des équipements électriques***

L'IA permet d'anticiper les défaillances des équipements critiques, optimisant ainsi la planification des interventions de maintenance et réduisant les temps d'arrêt imprévus.

- ***L'amélioration de l'efficacité énergétique des réseaux électriques***

Le pilotage automatique, basé sur l'IA, permet une intégration optimale des énergies renouvelables intermittentes et distantes dans le réseau. Il permet également d'identifier les points de perte d'énergie et de mettre en place des stratégies d'optimisation pour réduire la consommation globale d'énergie et d'améliorer la résilience et la stabilité du réseau.

- ***L'optimisation de la gestion des stocks de l'énergie***

L'optimisation mathématique et l'apprentissage automatique permettraient une gestion améliorée des stocks de l'énergie en tenant compte de la demande prévisionnelle et des contraintes d'approvisionnement.

- ***L'amélioration de l'accessibilité énergétique au milieu rural***

L'apprentissage automatique et l'optimisation mathématique pourraient être utilisés dans les projets mini-réseaux électriques autonomes pour l'électrification des zones rurales reculées, améliorant l'accès à l'énergie et le développement socio-économique.

- ***Le développement de chatbots intelligents pour les services client***

L'IA permet d'offrir des services client plus réactifs et personnalisés, en répondant efficacement aux questions des clients en temps réel. L'intégration stratégique des technologies d'IA dans ce

projet sera méticuleusement alignée sur les besoins spécifiques de l'ONEE et les objectifs définis dans la stratégie énergétique nationale et le nouveau modèle de développement afin de contribuer aux objectifs plus larges d'efficacité énergétique, de durabilité et de sécurité énergétique nationale.

3 Méthodologie de recherche

Pour mener cette étude, nous avons opté pour une méthodologie mixte qui combine l'analyse documentaire à une enquête de terrain. Cette section va détailler notre démarche sous forme de sous-sections suivantes :

3.1 Motivation et intérêt de recherche

L'intelligence artificielle (IA) a profondément transformé de nombreux secteurs économiques, y compris celui de l'énergie. Au Maroc, elle s'annonce comme un catalyseur de la modernisation du réseau électrique national, de l'amélioration de l'efficacité énergétique et de l'accélération de la transition vers des sources d'énergie durables. Cependant, cette avancée technologique n'est pas sans défis. Derrière son immense potentiel se cachent des enjeux complexes qui nécessitent une analyse approfondie et une approche holistique.

Notre étude se distingue par son ambition d'explorer ce domaine en plein essor sous un angle interdisciplinaire. En effet, l'intégration de l'IA dans le secteur énergétique implique une multitude de disciplines, allant des sciences de l'ingénieur et des matériaux à l'informatique, aux mathématiques, aux sciences économiques, aux sciences de l'information et de la communication, en passant par le droit.

Notre objectif est de combler une lacune dans la littérature spécialisée existante, d'enrichir les connaissances actuelles et d'ouvrir la voie vers de nouvelles pistes de réflexion. Notre expérience professionnelle d'environ 20 ans au Ministère de la Transition Énergétique et du Développement Durable (MTEED) et notre formation fondée, en science de l'information nous confère une vision interne objective du développement du secteur énergétique pendant ces deux dernières décennies et nous motive d'approcher ce sujet de recherche sous un angle interdisciplinaire afin d'avoir une vision globale et une compréhension approfondie des opportunités et défis liés à l'intégration de l'IA dans la modernisation des infrastructures électriques au Maroc, contribuant ainsi à l'avancement des connaissances dans le domaine de l'IA appliquée au secteur énergétique marocain.

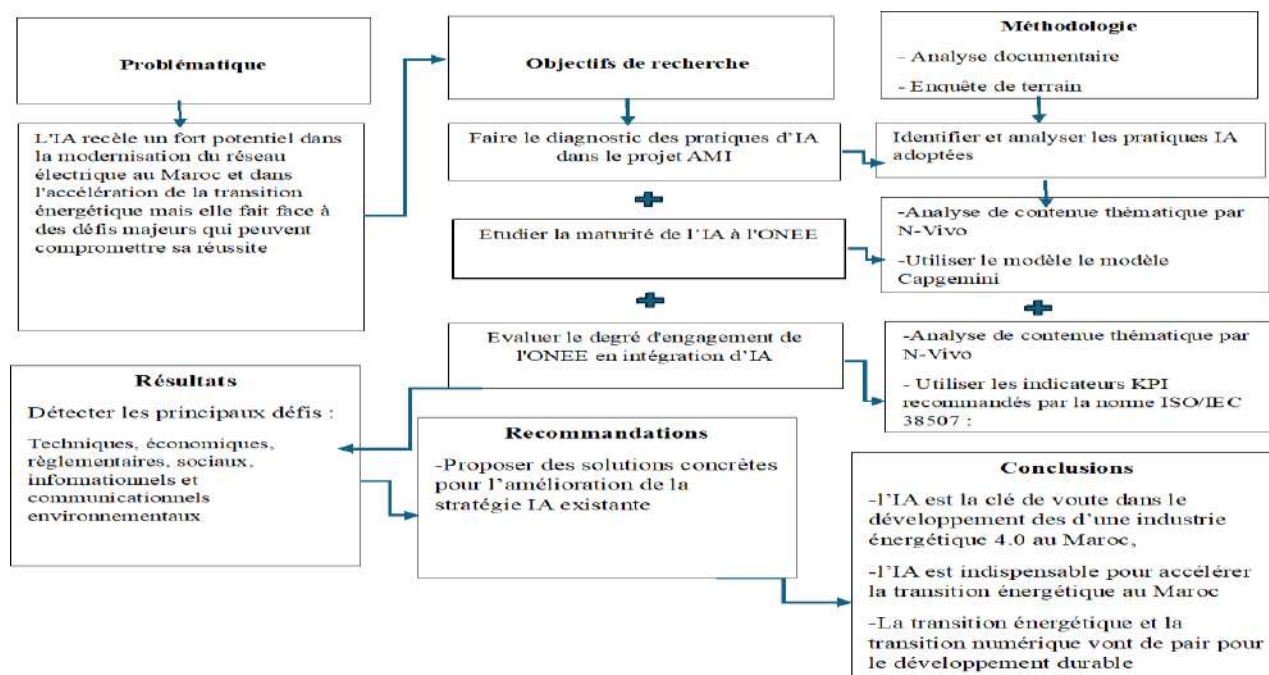
3.2 Objectifs et modèle de recherche

L'objectif global de notre recherche est d'examiner le potentiel de l'intelligence artificielle (IA) pour améliorer le réseau électrique au Maroc et son impact sur la transition énergétique durable du pays. Pour y parvenir, nous avons fixé les objectifs spécifiques suivants

1. Établir un état des lieux des pratiques d'IA dans le projet AMI ;
2. Évaluer le niveau de la maturité d'IA et le degré d'engagement de l'ONEE en son intégration ;
3. Formuler des recommandations pour assurer une intégration responsable et éthique de l'IA dans le projet AMI.

Le modèle de recherche présenté ci-dessous, vise à offrir une représentation structurée de notre démarche méthodologique mobilisée pour atteindre nos objectifs de recherche.

Figure 2 : Modèle de recherche évaluant niveau de maturité et degré d'engagement en IA à l'ONEE



Source : Auteurs

3.3 Terrain et période de recherche

3.3.1 Terrain de recherche

Notre étude se concentre sur le projet Advanced Metering Infrastructure (AMI) de l'Office National de l'Électricité et de l'Eau Potable (ONEE) déployé à la ville de Casablanca. Notre choix de terrain d'étude est justifié par trois arguments clés : la diversité énergétique à la ville de Casablanca, la représentativité démographique de cette ville et son statut en tant que ville intelligente (Smart City).

Premièrement, notre choix émane du choix stratégique de l'ONEE qui a sélectionné la ville de Casablanca en 2016 comme site pilote pour l'implantation du projet AMI.

En tant que pôle industriel majeur du Maroc, concentrant 46% de l'activité économique nationale en 2023(HCP, 2023), la ville offre un panorama complet des profils de consommation énergétique, allant de la très haute tension à la basse tension. Cette diversité permet d'évaluer l'adaptabilité du projet AMI à une large gamme de besoins énergétiques, renforçant ainsi la pertinence et l'applicabilité des résultats de recherche à l'échelle nationale. Deuxièmement, avec ses 3,6 millions d'habitants recensés en 2022 (ibid.), Casablanca présente un échantillon démographique représentatif de la société marocaine. Cette hétérogénéité démographique offre l'opportunité d'analyser l'efficacité du projet AMI dans des contextes variés, fournissant ainsi une compréhension globale de ses impacts potentiels sur l'ensemble du territoire national.

En outre, le statut de Casablanca, proclamée première ville intelligente d'Afrique en 2015 la distingue comme ville pionnière dans l'adoption des technologies intelligentes. Et puisque le projet du comptage électrique intelligent constitue une composante majeure dans dynamique du développement urbain intelligent, notre choix de la ville de Casablanca comme terrain d'étude paraît alors judicieux et pertinent.

3.3.2 Période de recherche

La période d'étude choisie et qui d'étend de décembre 2022 à avril 2024, offre un cadre temporel particulièrement pertinent pour analyser l'évolution de l'ONEE en matière d'intelligence

artificielle (IA) dans le contexte du projet AMI. Cette fenêtre de 16 mois a été sélectionnée pour plusieurs raisons :

Tout d'abord, cette période s'inscrit dans une conjoncture économique mondiale marquée par des crises successives - énergétique, sanitaire, géopolitique. Ces défis ont incité l'ONEE à intensifier ses efforts dans le développement de solutions énergétiques durables basées sur l'IA pour moderniser le réseau électrique national et la phase d'accélération du projet AMI s'inscrit dans cette période.

En outre, au cours de cette période, le Maroc s'est engagé à intégrer l'IA de manière responsable et éthique dans divers secteurs dont l'énergie. Cet engagement a été officialisé lors de la présentation du « rapport d'évaluation de l'état de préparation à l'intelligence artificielle » devant l'UNESCO. De plus, cet élan s'est renforcé davantage en début 2024 avec l'annonce gouvernementale d'une stratégie nationale pour l'IA, dans le cadre du plan « Maroc numérique 2030 ». En somme, cette période d'étude nous offre un contexte unique pour étudier comment l'ONEE navigue entre les défis économiques et énergétiques mondiaux et entre les ambitions et les directives énergétiques et numériques nationales en tirant parti du potentiel de l'IA pour assurer une gestion plus intelligente et durable de l'énergie au Maroc.

3.4 Méthodes et outils d'investigation

3.4.1 L'analyse documentaire

L'analyse documentaire a constitué une étape préliminaire fondamentale pour notre recherche. Elle a servi de socle pour contextualiser la recherche et clarifier les concepts clés inhérents à notre champ d'investigation et de rédiger notre revue de la littérature. De plus, elle nous a permis d'identifier les pratiques d'IA déployées dans le projet AMI et de mettre en lumière les opportunités offertes par l'IA pour la modernisation du réseau électrique marocain.

Pour constituer notre corpus documentaire, nous avons d'abord effectué une sélection rigoureuse de sources scientifiques fiables. Pour ce faire, nous avons exploité des bases de données académiques de renommée internationale telles que Web of Science, Cairn Info, Science Direct, Google Scholar et Research Gate. Notre corpus documentaire s'est enrichi d'une variété de documents pertinents, incluant des articles scientifiques, des chapitres de monographies, des normes et standards internationaux relatifs à notre sujet de recherche, des rapports techniques, des politiques internes, des feuilles de route, ainsi que des sites web institutionnels relevant de notre domaine d'étude. Ensuite, pour affiner nos requêtes et identifier les documents les plus pertinents et les plus récents, nous avons utilisé les opérateurs booléens "AND" et "OR". Grâce à cette démarche, nous avons pu créer des requêtes ciblées à partir de multiples combinaisons de mots-clés, ce qui a amélioré la précision et l'exhaustivité de notre recherche documentaire.

In fine, nous avons mis en place des critères rigoureux d'inclusion et d'exclusion pour construire un corpus documentaire solide, fiable et à jour. Grâce à cette étape cruciale, nous avons pu assurer la qualité et la pertinence des documents retenus et nous avons pu constituer un socle robuste pour étayer notre analyse et nos conclusions.

Notre démarche a abouti à la constitution d'un corpus documentaire comprenant 24 documents sélectionnés selon des critères d'inclusion et d'exclusion détaillés sur le tableau 5 ci-après.

Notre étude se fonde sur une sélection rigoureuse de documents couvrant trois domaines clés, chacun avec une période de référence spécifique. Pour l'intelligence artificielle (IA), nous avons ciblé la période 2016-2024, reflétant la nature dynamique et l'évolution rapide de ce domaine relativement récent. Concernant les textes fondamentaux sur la transition énergétique, notre analyse s'étend sur les deux dernières décennies, prenant en compte la longue histoire de ce domaine et les développements majeurs survenus depuis le « Sommet de la Terre » de Rio et les Conférences des Parties (COP) subséquentes. Enfin, pour les rapports publiés par les Nations Unies (ONU), notre sélection remonte à 1987, date charnière correspondant à la publication du

« Rapport Brundtland », document fondateur qui a introduit pour la première fois le concept de développement durable. Cette approche différenciée dans la sélection des périodes de référence nous a permis de constituer un corpus documentaire à la fois actualisé et historiquement pertinent pour offrir une perspective complète sur l'évolution de l'intégration de l'IA dans le secteur énergétique.

Tableau 5 : Critères d'inclusion et d'exclusion

Critère	Inclusion	Exclusion
Période de référence	-Articles publiés entre 2016 et 2024 -Articles fondamentaux sur la transition énergétique publiés pendant les vingt dernières années -Rapports ONU remontant jusqu'à 1987.	-Articles publiés avant 2016 -Articles fondamentaux publiés avant les vingt dernières années -Rapports officiels de l'ONU publiés avant 1987.
Langue	-Publications rédigées en anglais ou en français	Publication dans d'autres langues
Source	-Articles indexés et révisés par les pairs ; -Bases de données et moteurs de recherche académiques ; -Sites web institutionnels.	-Articles publiés dans d'autres sources et non révisés par les pairs ; - Bases de données non académiques et moteurs de recherche généraux ; -Sites web non institutionnels.
Thématique	-Documents étroitement liés à notre thématique de recherche	-Documents traitants d'autres thématiques
Disponibilité	-Documents disponibles en texte intégral gratuitement	-Documents inaccessibles ou payants

Source : Auteurs

3.4.2 L'enquête de terrain : les entretiens semi-directifs

Afin d'obtenir une compréhension approfondie du projet AMI, et pour enrichir notre méthodologie, une enquête de terrain par entretiens semi-directifs, a été réalisée auprès des acteurs clés du projet AMI. Cette sous-section détaille la démarche employée.

3.4.2.1 Sélection de la population cible

Un échantillon de 12 responsables de l'ONEE a été sélectionné selon quatre critères principaux :

- **Niveau hiérarchique élevé :**

Nous avons ciblé les directeurs et les cadres supérieurs capables d'influencer les orientations stratégiques et de participer à la décision.

- **Implication directe dans le projet AMI :**

Le choix d'une population directement impliquée dans le projet AMI était crucial pour obtenir des informations précises et actualisées sur ses réalisations, son état d'avancement, ses défis et ses perspectives.

- **Diversité d'expertise :**

La sélection d'une population issue de différentes directions de l'ONEE impliquée dans le projet AMI permet d'avoir une vision globale sur les aspects techniques, opérationnels, stratégiques et communicationnels de ce projet.

- **Expérience professionnelle et capacité d'analyse :**

L'expérience professionnelle et la capacité d'analyse chez les participants offre des insights sur les défis énergétiques nationaux et sur les perspectives de développement du secteur.

Tableau 6: Population cible de l'étude

Code Entretien	Profil	Années de service	Durée de l'entretien (minutes)
P1	Chef du projet AMI	23	60
P2	Directeur de la Distribution	38	30
P3	Chef de division à la Direction de la Distribution	21	45
P4	Chef de division à la Direction de la Distribution	18	30
P5	Chef de division à la Direction des Systèmes d'information	22	45
P6	Chef de division à la Direction des Systèmes d'information	19	45
P7	Chef de service à la Direction des Systèmes d'information	10	30
P8	Directeur de la Stratégie et de la Planification	35	30
P9	Chef de division à la Direction des Études et de la Recherche	27	45
P10	Chef de division à la Direction des Études et de la Recherche	25	45
P11	Chef de la Division de la Communication	26	60
P12	Chef de service la Division de la Communication	12	45

Source : Auteurs

3.4.2.2 Conduite des entretiens

Pour favoriser des échanges riches et constructifs avec les participants, des entretiens semi-directifs (Demony, 2016), d'une durée moyenne de 45 minutes, ont été menés entre janvier et mars 2023 en présentiel au siège de l'ONEE ou par visio-conférence. Pour une meilleure préparation des participants, des guides d'entretien ont été distribués en amont par l'intermédiaire de la responsable de la division de la communication de l'ONEE.

3.4.2.3 Analyse des entretiens

Notre étude sur le projet AMI de l'Office National de l'Electricité (ONEE) s'est appuyée sur des entretiens avec 12 acteurs clés. Ces échanges nous ont fourni des informations précieuses sur l'utilisation actuelle de l'IA, son niveau d'intégration et sur les enjeux stratégiques dans le projet AMI. Pour analyser ces données, nous avons opté pour une analyse de contenu thématique manuelle (Negura, 2006), une méthode qualitative particulièrement adaptée à notre échantillon restreint.

Cette approche nous a permis d'explorer en profondeur les perceptions et les expériences des participants. Notre processus d'analyse des données, extraites des entretiens, s'est déroulé en quatre étapes :

- Retranscription intégrale des entretiens sur le logiciel Excel et relecture du contenu ;
- Codage des données pour identifier les thématiques clés et les concepts émergents ;
- Regroupement des codes en thématiques principales ;
- Analyse des données codées et interprétation des résultats en se basant sur les extraits les plus pertinents.

Pour compléter l'analyse de contenu thématique et rendre nos résultats plus lisibles et mesurables, nous avons utilisé le modèle Capgemini pour évaluer la maturité de l'IA chez les responsables de l'ONEE, ainsi que des KPI recommandés par la norme ISO/IEC 38507 :2022 pour évaluer le degré d'engagement de l'ONEE en projets IA. Cette approche mixte, combinant l'analyse qualitative et quantitative pour analyser les entretiens, nous a permis de croiser les données pour avoir une compréhension plus complète et une vision globale des pratiques de l'IA dans le projet du comptage intelligent de l'ONEE et son engagement à son intégration.

4 Résultats

Cette section présente les résultats de notre recherche relatifs à l'évaluation de la maturité de l'IA au sein de l'ONEE et son niveau d'engagement envers l'intégration des technologies d'IA dans

ses projets. L'analyse des données collectées lors de l'enquête de terrain a été réalisée en utilisant deux approches méthodologiques complémentaires :

- Analyse de contenu thématique : cette approche a permis d'identifier les thèmes récurrents et les perceptions des responsables de l'ONEE concernant l'IA.
- Application du modèle Capgemini et des KPI de la norme ISO sur l'IA : Ce cadre d'évaluation a permis de mesurer la maturité de l'IA à l'ONEE en s'appuyant sur des indicateurs clés de performance (KPI).

4.1 Résultat de l'analyse thématique

L'analyse thématique des entretiens semi-directifs menés auprès des responsables de l'ONEE a révélé quatre thématiques principales qui reflètent les préoccupations, l'engagement et les perspectives concernant l'intégration de l'IA dans le secteur énergétique marocain :

- ***Thématique 1 : Transformation du secteur énergétique marocain par l'IA***

Les participants ont unanimement reconnu le potentiel transformateur de l'IA dans le secteur énergétique. Le participant 1 souligne cette importance « L'IA est un outil crucial pour améliorer l'efficacité de notre système énergétique, en optimisant la gestion des réseaux et en réduisant les pertes d'énergie. Cela contribuera à une meilleure gestion des ressources et à une transition énergétique durable. » Cette idée est confirmée par les participants 2 et 8 qui mettent en évidence un consensus au sein de l'ONEE sur la nécessité de moderniser le réseau électrique national grâce à l'IA « *L'IA peut révolutionner le développement des sources d'énergie renouvelable en permettant de prédire la production solaire et éolienne avec plus de précision et d'optimiser l'intégration de ces sources dans le réseau électrique national qui doit absolument être modernisé dans l'urgence.* »

- ***Thématique 2 : Nécessité d'un cadre réglementaire et normatif pour régir l'IA dans le secteur énergétique marocain***

La deuxième thématique qui émerge concerne la nécessité d'établir un cadre réglementaire et normatif robuste pour encadrer l'utilisation de l'IA dans le secteur énergétique. Les participants 5 et 3 soulignent cette préoccupation « Un cadre réglementaire clair et harmonisé est essentiel pour encadrer l'adoption de l'IA dans le secteur énergétique. Cela permettra de garantir la sécurité des données, la protection de la vie privée et l'utilisation éthique de l'IA ». Les Participants 6 et 7 renforcent cette idée en mettant l'accent sur la sécurité et l'éthique également « *Des normes de sécurité rigoureuses et des chartes d'éthique sont indispensables pour garantir la confiance des clients dans l'utilisation de l'IA dans le secteur énergétique.* »

- ***Thématique 3 : Priorité à l'acceptabilité sociale de l'IA appliquée à l'énergie***

La troisième thématique concerne l'importance de l'acceptabilité sociale et de la confiance des clients de l'ONEE dans l'adoption des infrastructures et services énergétiques basés sur l'IA. Les Participants 11 et 12 expriment cette préoccupation « Il est important de prendre en compte dans nos stratégies des préoccupations sociales liées la sécurité et la protection des données personnelles de nos clients ». L'idée de l'adoption inclusive a été exprimée par le participant 12 en complément de son premier propos « *Une communication claire et transparente sur les avantages de l'IA dans les services énergétiques et un message de mise en confiance des clients, dans ce sens, est indispensable pour accompagner le changement et éviter toute forme de résistance.* » garantir une adoption inclusive de l'IA ».

- ***Thématique 4 : Potentiel de l'IA générative pour révolutionner le paysage énergétique***

La dernière thématique met en lumière le potentiel de l'IA générative dans le secteur énergétique. Le participant 1 souligne que « *L'IA générative ouvre de nouvelles perspectives pour le développement de solutions innovantes dans le secteur énergétique, notamment dans la gestion*

intelligente des réseaux et la création de nouveaux modèles énergétiques ». Les Participants 4 et 9 quant à eux, introduisent le concept émergent « industrie énergétique 4.0 » « L'IA générative peut contribuer à la création d'une industrie électrique au Maroc dont l'essence est la donnée et c'est ce que nous espérons que l'IA apportera au secteur énergétique marocain très prochainement ».

4.2 Analyse du niveau de la maturité d'IA à l'ONEE selon le modèle Capgemini

D'après les entretiens semi-directifs et le modèle Capgemini, le niveau de maturité en IA de l'ONEE se situe entre les niveaux 2 et 3. En effet, 58% des participants maîtrisent les technologies d'IA déployées dans le cadre du projet AMI et ont un accès illimité à toutes les applications IA disponibles (niveau 3 - Déploiement). 34% des participants utilisent les outils d'IA avec des accès limités en fonction de leur poste et de leurs tâches (niveau 2 - Expérimentation). Les 8% restants sont principalement des membres de la division de la communication qui couvrent la tâche de la stratégie communicationnelle pour accompagner le projet, mais qui sont directement liés au projet et de nouvelles recrues qui sont encore en phase d'exploration de l'IA (niveau 1 - Ad hoc).

Ce niveau de maturité intermédiaire indique que l'ONEE a fait des progrès significatifs dans l'intégration de l'IA dans ses opérations, mais qu'il reste encore du chemin à parcourir pour une adoption généralisée et une utilisation stratégique de l'IA.

4.3 Évaluation du degré d'engagement d'IA selon la norme ISO/IEC 38507 :2022

Sur la base des entretiens semi-directifs et la norme ISO/IEC 38507 :2022, qui fournit les lignes directrices pour la gouvernance de l'IA au sein des organisations, 75% des participants sont prêts à l'intégration de l'IA dans les projets énergétiques et même dans les processus métier de l'ONEE pour améliorer la performance organisationnelle de l'office. Des projets pilotes, tels que la maintenance prédictive des réseaux électriques et la gestion intelligente de la demande, sont en cours de développement et témoignent du potentiel de l'IA pour contribuer à une industrie électrique innovante et durable au Maroc.

Les 25% de participants restants expriment également leur intérêt pour l'IA, mais soulignent l'importance d'une adoption responsable et éthique. Ils soulèvent des préoccupations concernant l'absence d'un cadre juridique et éthique clair au Maroc pour réguler l'utilisation de l'IA, le besoin en formations en IA et le développement de compétences en la matière, la crainte de disparition de quelques métiers à l'ONEE ainsi que la résistance potentiel des clients de l'ONEE vis-à-vis les projets basés sur l'IA comme le projet des compteurs intelligents.

5 Discussion

Cette section présente une discussion des résultats clés de l'étude sur le niveau de maturité et l'engagement de l'ONEE vis-à-vis de l'IA. Elle aborde également les défis identifiés pendant l'étude, ainsi que les limites de recherche ainsi que des recommandations qui peuvent guider l'ONEE à réussir l'adoption d'une IA responsable et éthique.

Le diagnostic des pratiques de l'IA à l'onee par l'analyse du niveau de maturité et de l'engagement de l'office vis-à-vis de l'intelligence artificielle (IA) a révélé plusieurs résultats clés. Tout d'abord, l'ONEE se situe au niveau 2-3 du modèle de maturité Capgemini. Ce positionnement montre que l'organisation a fait des progrès significatifs dans l'intégration de l'IA, mais qu'il faut renforcer les efforts pour atteindre une meilleure adoption et une meilleure utilisation de l'IA dans le secteur énergétique marocain. De plus, 75 % des participants aux entretiens semi-directifs se montrent et partant à l'intégration de l'IA non seulement dans les projets énergétiques, mais également dans les processus métier de l'ONEE.

Les résultats montrent également que des projets pilotes d'IA sont en cours de développement, comme la maintenance prédictive des réseaux électriques et la gestion intelligente de la demande, ce qui confirme l'engagement effectif de l'ONEE en intégration de l'IA pour développer une industrie électrique innovante et durable (4.0) au Maroc. Cependant, les participants ont exprimé des préoccupations et des craintes concernant l'adoption de l'IA au secteur énergétique et ont évoqué plusieurs défis notamment :

- ***Défis techniques et défis technologiques liés à la recherche et développement***

La mise en œuvre de l'IA nécessite une infrastructure informatique fiable et sécurisée, apte à supporter les applications d'IA. De plus, la qualité et la quantité des données sont cruciales pour entraîner et alimenter les modèles d'IA ce qui nécessite d'accentuer la recherche dans le domaine pour le développement de solutions innovantes pour pallier ce manque de données.

L'implémentation de l'IA dans les systèmes existants jugés caduque et dans les processus métier constitue également un défi technique important qui nécessite de développer une culture de l'IA et un développement de compétences au sein de l'ONEE et chez les consommateurs.

- ***Défis réglementaires et éthiques***

L'absence d'un cadre juridique clair pour réguler l'usage de l'IA au Maroc en général et dans le secteur énergétique en particulier, pose des défis majeurs. Les risques liés à la protection des données et à la vie privée et des données personnelles doivent être réglés pour assurer une adoption sûre et responsable et confiante de l'IA. Les questions éthiques, telles que la transparence, l'explicabilité et la responsabilité, sont également cruciales pour une intégration réussie.

- ***Défis économiques, sociaux, communicationnels et informationnels***

L'impact potentiel de l'IA sur l'emploi est une préoccupation majeure d'où la nécessité de programmer des formations et des formations continues en IA pour le personnel de l'ONEE pour le mettre à niveau. On mentionne également le risque de fracture numérique et un risque de résistance aux technologies nouvelles dans le secteur énergétique qui nécessitant des efforts en matière de formation et de communication pour garantir un accès équitable à l'IA dans les services énergétiques et assurer l'acceptabilité sociale.

- ***Défis environnementaux***

Bien que l'IA offre un potentiel important en réduction des impacts environnementaux en réduisant la consommation des fossiles et en réduisant les pertes sur le réseau électrique, elle peut engendrer un impact sur les émissions de gaz à effet de serre dégagés par les data centers qui gèrent les données massives, notamment les données de consommation électrique, d'où la nécessité de développer des applications d'IA plus durables et respectueuses de l'environnement pour minimiser cet impact.

- ***Défis de la collaboration***

L'intégration réussie de l'IA dans le secteur énergétique marocain fait également face à des défis liés à la collaboration. Pour la réussir, il est préconisé de promouvoir une coordination étroite entre les institutions gouvernementales, de développer des partenariats public-privé, et d'impliquer activement les centres de recherche et les universités à l'échelle nationale. Sur le plan international, l'ONEE devrait encourager l'échange d'expériences avec des acteurs étrangers, effectuer une veille technologique continue et participer à des projets collaboratifs transnationaux. Cette approche collaborative vise à mutualiser les ressources et les connaissances, accélérer l'innovation et l'adaptation des solutions d'IA, et assurer une mise en œuvre cohérente et efficace à l'échelle du secteur, permettant de surmonter les défis techniques,

réglementaires et sociaux, et de maximiser les bénéfices de l'IA pour une industrie électrique plus durable au Maroc.

En comparant l'expérience marocaine avec celles de la France et de l'Allemagne en matière d'intégration de l'IA dans la modernisation des réseaux électriques, nous observons un paysage énergétique complexe, marqué par des défis communs et des particularités nationales. Ces trois pays, malgré leurs différences, sont confrontés à des enjeux similaires : la nécessité de rénover des infrastructures obsolètes, la maîtrise des coûts d'approvisionnement croissants et l'adaptation à un environnement réglementaire en constante évolution. Ils partagent également des préoccupations liées à la compétitivité économique, à la souveraineté énergétique et à l'acceptabilité sociale de ces transformations.

Toutefois, le Maroc se distingue par son contexte géopolitique et climatique spécifique : Contrairement à la France et à l'Allemagne, le royaume n'a pas encore intégré l'énergie nucléaire dans son mix énergétique, ce qui pourrait façonner une trajectoire unique pour sa transition énergétique, surtout que le Maroc s'est engagé volontairement à réduire son empreinte carbone, bien qu'il soit un pays à faible émission de gaz à effet de serre.

En revanche, le Maroc peut s'inspirer des expériences françaises et allemandes, notamment des projets de déploiement des réseaux électriques intelligents, « Linky » en France et le programme « E-Energy » en Allemagne, pour optimiser le déploiement de ses réseaux intelligents. La synergie entre acteurs publics et privés, un élément clé du succès dans ces deux pays européens, pourrait servir de modèle au Maroc pour accélérer sa transition énergétique et renforcer sa compétitivité sur la scène régionale et internationale.

Cependant, il est important de noter à la fin de cette section que notre étude présente plusieurs limites. Tout d'abord, le choix d'un échantillon restreint, limité uniquement aux responsables du projet AMI, pourrait ne pas refléter les perceptions et les attitudes de l'ensemble des employés de l'ONEE. Des recherches futures devraient inclure d'autres catégories d'employés pour une vision plus représentative. En outre, la nature stratégique et confidentielle des informations relatives aux projets basés sur l'IA en cours de développement a limité l'accès à certaines données cruciales. Enfin, l'étude a été réalisée sur une période limitée, ce qui peut ne pas fournir des insights suffisamment approfondis sur l'évolution de l'intégration de l'IA à l'ONEE.

6 Conclusion

Notre étude sur l'intelligence artificielle (IA) dans le secteur énergétique marocain va au-delà d'un simple diagnostic ; elle vise à fournir des insights précieux pour guider l'adoption stratégique de l'IA et à contribuer à une industrie énergétique fondée sur les données. En développant de nouveaux modèles énergétiques, l'IA peut jouer un rôle clé dans une transition énergétique inclusive, durable et innovante, répondant aux besoins et aspirations des consommateurs. Ceux-ci, devenus acteurs de leur consommation, peuvent désormais participer activement à la production et à la gestion de l'énergie grâce à l'IA.

Notre objectif principal est d'ouvrir la voie à une discussion constructive sur les défis et les opportunités liés à l'IA dans le secteur énergétique. Les recommandations concrètes formulées dans cette étude visent à améliorer l'efficacité et la durabilité du système énergétique marocain, tout en contribuant aux objectifs de développement durable. Cette étude offre une vue d'ensemble précieuse sur l'état d'avancement de l'IA dans le secteur énergétique marocain et incite à poursuivre la recherche et le développement dans ce domaine. Il est également essentiel de renforcer la collaboration avec d'autres pays pour identifier des solutions énergétiques durables, inclusives et innovantes.

L'IA, en tant que catalyseur de la transition numérique, peut jouer un rôle crucial dans la réalisation de ces objectifs. Notre étude met la donnée au cœur de la stratégie énergétique. L'intégration de l'IA permet d'exploiter pleinement le potentiel des données pour optimiser la

production, la distribution et la consommation d'énergie. En conclusion, nous recommandons de repenser la transition énergétique et de la lier étroitement à la transition numérique. Le développement des compétences, tant au sein de l'ONEE que chez les consommateurs d'énergie, est indispensable pour réussir cette double transition.

Enfin, nous rappelons l'importance de respecter les droits de l'homme dans le développement et l'utilisation de l'IA, en veillant à ce que l'humain conserve la responsabilité ultime des décisions. Cette étude constitue une étape importante dans la réflexion sur le secteur énergétique marocain de demain. Elle ouvre la voie à de nouvelles perspectives et invite à une collaboration active entre tous les acteurs concernés pour bâtir un avenir énergétique durable, inclusif et innovant, propulsé par une IA responsable et éthique.

Références

- (1). Académie des sciences, Acatech, Leopoldina, & Académie des technologies. (2015). Transition énergétique en France et en Allemagne <https://www.academie-sciences.fr/fr/Rapports-ouvrages-avis-et-recommandations-de-l-Academie/la-transition-energetique-en-france-et-en-allemande.html>.
- (2). Ahmad, T., Zhang, D., Huang, C., Zhang, H., Dai, N., Song, Y., & Chen, H. (2021). Artificial intelligence in sustainable energy industry: Status quo, challenges and opportunities. *Journal of Cleaner Production*, 289, 125834. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.125834>.
- (3). AIE. (2017). *World Energy Outlook*. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2017>.
- (4). AIE. (2021). *La transition vers les énergies renouvelables en Afrique: Renforcer l'accès, la résilience et la prospérité*. <https://www.iea.org/reports/renewable-energy-transition-in-africa>.
- (5). Ayres, R. U., & Warr, B. (2009). *The Economic Growth Engine : How Energy and Work Drive Material Prosperity*. Edward Elgar Publishing. <https://doi.org/10.4337/9781848445956>.
- (6). Bourdin, S., & Maillefert, M. (2020). L'économie circulaire: Modes de gouvernance et développement territorial. *Natures Sciences Sociétés*, 28(2), 101-107. <https://doi.org/10.1051/nss/2020033>.
- (7). Carbonnier, G., & Grinevald, J. (2011). Energie et développement. *Revue internationale de politique de développement*, 2(2), 9-28. <https://doi.org/10.4000/poldev.687>.
- (8). Chen, C., Hu, Y., Karuppiyah, M., & Kumar, P. M. (2021). Artificial intelligence on economic evaluation of energy efficiency and renewable energy technologies. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 47, 101358. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101358>.
- (9). Collard, F. (2015). Les énergies renouvelables. *Courrier hebdomadaire du CRISP*, 2252-2253(7), 5-72. <https://doi.org/10.3917/cris.2252.0005>.
- (10). Collard, F. (2017). La transition énergétique. *Courrier hebdomadaire du CRISP*, 2321(36), 5-44. <https://doi.org/10.3917/cris.2321.0005>.
- (11). CRE. (2019). *Schéma décennal de développement du réseau*. <https://www.cre.fr/Documents/Publications/Schema-decennal-de-developpement-du-reseau>.
- (12). Debusschere, V., & Mallet, P. (2020). *Think-Smartgrids_IA-Reseaux_DEF-WEB-1.pdf*. https://www.thinksmartgrids.fr/wp-content/uploads/2020/09/Think-Smartgrids_IA-Reseaux_DEF-WEB-1.pdf.

- (13). Degron, R. (2023). Développement durable et environnement: Les objectifs de l'ONU ignorent-ils la géographie? *Les Analyses de Population & Avenir*, 45(3), 1-25. <https://doi.org/10.3917/lap.045.0001>.
- (14). Demoncy, A. (2016). La recherche qualitative: Introduction à la méthodologie de l'entretien. *Kinésithérapie, la Revue*, 16(180), 32-37. <https://doi.org/10.1016/j.kine.2016.07.004>.
- (15). Depuru, S. S. S. R., Wang, L., & Devabhaktuni, V. (2011). Smart meters for power grid: Challenges, issues, advantages and status. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(6), 2736-2742. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.02.039>.
- (16). Eyl-Mazzega, M.-A. (2019). La dimension stratégique de la transition énergétique. Défis et réponses pour la France, l'Allemagne et l'Union européenne.
- (17). Gautier, A. (2015). Repenser la tarification de l'énergie. *Reflets et perspectives de la vie économique*, LIV(1), 175-184. <https://doi.org/10.3917/rpve.541.0175>.
- (18). Glachant, J.-M. (2002). L'approche néo-institutionnelle de la réforme des industries de réseaux. *Revue économique*, 53(3), 425. <https://doi.org/10.3917/reco.533.0425>.
- (19). Goyens, V. (2012). La maîtrise de la consommation d'énergie depuis les années 1970: La politique d'utilisation rationnelle de l'énergie en région Wallonne. *Annales historiques de l'électricité*, 10(1), 73-84. <https://doi.org/10.3917/ahe.010.0073>.
- (20). Grandjean, A. (2014). La transition énergétique en France. *Études*, avril (4), 29-39. <https://doi.org/10.3917/etu.4204.0029>.
- (21). Grooss, O. F., Presser, M., & Tambo, T. (2022). Balancing digital maturity and operational performance progressing in a low-digital SME manufacturing setting. *Procedia Computer Science*, 200, 495-504. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.01.247>.
- (22). He, J. (2010). Chapitre 1. Introduction à l'économie de l'environnement: Efficacité, externalité et gestion de la pollution. In *Le développement durable* (pp. 9-22). Dunod. <https://doi.org/10.3917/dunod.wolff.2010.01.0009>.
- (23). IRENA. (2021). *La transition vers les énergies renouvelables en Afrique*. <https://www.irena.org/fr/Africa-Renewable-Energy-Trends-2021>.
- (24). ISO. (2022). *Plateforme de consultation en ligne (OBP)*. <https://www.iso.org/obp/ui/fr/#>.
- (25). Jumel, S., & Mallet, P. (2023). Les enjeux de la numérisation pour les gestionnaires du réseau de distribution. *Annales des Mines - Responsabilité et environnement*, 109(1), 77-81. <https://doi.org/10.3917/re1.109.0077>.
- (26). Keppler, J. H. (2004). La quête d'une théorie de la concurrence empiriquement pertinente: Les leçons de la révolution de la concurrence monopolistique. *Revue économique*, 55(3), 557. <https://doi.org/10.3917/reco.553.0557>.
- (27). Lee, J., & Yang, J.-S. (2019). Global energy transitions and political systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 115, 109370. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109370>.
- (28). Liu, L., Yang, K., Fujii, H., & Liu, J. (2021). Artificial intelligence and energy intensity in China's industrial sector: Effect and transmission channel. *Economic Analysis and Policy*, 70, 276-293. <https://doi.org/10.1016/j.eap.2021.03.002>.
- (29). Milán-García, J., Uribe-Toril, J., Ruiz-Real, J., & De Pablo Valenciano, J. (2019). Sustainable local development: An overview of the state of knowledge. *Resources*, 8(1), 31. <https://doi.org/10.3390/resources8010031>.
- (30). Nations Unies. (1986). *Rapport des Nations Unies*. <https://www.un.org/fr/>.
- (31). Negura, L. (2006). L'analyse de contenu dans l'étude des représentations sociales. *Sociologies*. <https://doi.org/10.4000/sociologies.993>.
- (32). OECD. (2024). *Defining AI incidents and related terms*. <https://www.oecd.org/ai/defining-ai-incidents-and-related-terms.htm>.

- (33). ONU. (2015). *Objectifs du Millénaire pour le développement*. <https://www.un.org/fr/millenniumgoals/>.
- (34). Panek, M., Pomykała, A., Jabłoński, I., & Woźniak, M. (2023). 5G/5G+ network management employing AI-based continuous deployment. *Applied Soft Computing*, 134, 109984. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2023.109984>.
- (35). Percebois, J. (2001). Énergie et théorie économique: Un survol. *Revue d'économie politique*, 111(6), 815-860. <https://doi.org/10.3917/redp.116.0815>.
- (36). Percebois, J. (2018). La transition électrique, entre marchés et objectifs politiques. *Annales des Mines - Responsabilité et environnement*, 93(1), 76-80. <https://doi.org/10.3917/re1.093.0076>.
- (37). Tiss, S., & Orellano, M. (2023). A Maturity Model of Digital Transformation in Supply Chains: A Multi-dimensional Approach. In 2023 27th International Conference on Information Technology (IT) (pp. 1-7). IEEE. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10078510/>.
- (38). Vial, G. (2019). Understanding digital transformation: A review and a research agenda. *The Journal of Strategic Information Systems*, 28(2), 118-144. <https://doi.org/10.1016/j.jsis.2019.01.003>.
- (39). Wolbring, T. (2020). Rationality, strategic interactions, and theories of middle range. *Social Science Information*, 59(4), 569-574. <https://doi.org/10.1177/0539018420964390>.
- (40). Zhou, B., Zhang, K., Chan, K. W., Li, C., Lu, X., Bu, S., & Gao, X. (2021). Optimal coordination of electric vehicles for virtual power plants with dynamic communication spectrum allocation. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 17(1), 450-462. <https://doi.org/10.1109/TII.2020.2986883>.
- (41). Zhu, S., Ota, K., & Dong, M. (2022). Energy-Efficient Artificial Intelligence of Things with Intelligent Edge. *IEEE Internet of Things Journal*, 9(10), 7525-7532. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2022.3143722>.