

**FINANCE VERTE ET OBLIGATIONS DURABLES : CADRE
JURIDIQUE INTERNATIONAL ET APPORT DE L'INTELLIGENCE
ARTIFICIELLE**

**SOUSTAINABLE FINANCE AND BONDS: INTERNATIONAL LEGAL
FRAMEWORK AND CONTRIBUTION OF ARTIFICIEL
INTELLIGENCE**

▪ **LAKHYAR Zouhair** Professeur de l'enseignement supérieur en sciences économiques–Laboratoire Performance Economique et Logistique (PEL) – FSJES Mohammedia/Université Hassan II Casablanca.
E-mai : zlakhyar@yahoo.fr

▪ **HASSNAOUI Mohamed**, Doctorant en sciences économiques–Laboratoire Performance Economique et Logistique (PEL) – FSJES Mohammedia/Université Hassan II Casablanca.
E-mai : mohamed.hassnaoui-etu@etu.univh2c.ma

▪ **ESSALIHI Badrddine**, Doctorant en sciences économiques–Laboratoire Performance Economique et Logistique (PEL) – FSJES Mohammedia/Université Hassan II Casablanca.
E-mai : essalihi.badr@gmail.com

RESUME :

Face aux enjeux climatiques croissants, la finance verte et en particulier les obligations durables, apparaît comme un outil essentiel pour orienter les capitaux vers des projets durables et respectueux de l'environnement. Encadrées par des normes internationales telles que les *Green Bond Principles* et la *taxonomie verte de l'UE*, ces obligations visent à garantir la transparence et la durabilité des investissements. L'intelligence artificielle (IA) révolutionne ce secteur en facilitant l'évaluation automatisée des projets, la détection du "greenwashing", la notation climatique dynamique et le suivi des processus de financement desdits projet de façon transparente via les techniques de "blockchain". Ces apports technologiques améliorent la confiance des investisseurs, réduisent les coûts de vérification et pourraient stimuler le volume global des émissions. Pour cerner l'impact des investissements en capital-risque dans l'IA et la durabilité environnementale sur le volume d'émission des obligations vertes à l'échelle mondiale, une étude empirique menée sur la période 2012-2021 montre qu'à court terme, ces investissements ont un impact immédiat négatif et significatif au seuil de 5% sur les émissions des green bonds. Cet impact est devenu positif durant les trois périodes (trimestres) qui suivent. A long terme, on constate un effet structurel négatif des investissements en capital-risque dans l'IA et la durabilité environnementale sur le volume d'émission des obligations vertes. Ce résultat suggère un potentiel important de l'IA dans le

développement de la finance verte, à condition que ces deux domaines n'entrent pas, dans le long terme, en compétition dans l'attraction des fonds sur les marchés financiers.

MOTS CLES:

Finance verte, obligations durables, durabilité environnementale, Intelligence artificielle, greenwashing, blockchain.

SUBSTRACT:

In the face of growing climate challenges, green finance, and sustainable bonds in particular, is emerging as an essential tool for directing capital towards sustainable and environmentally friendly projects. Governed by international standards such as the Green Bond Principles and the EU Green Taxonomy, these bonds aim to ensure the transparency and sustainability of investments. Artificial intelligence (AI) is revolutionising this sector by facilitating automated project assessment, greenwashing detection, dynamic climate rating and transparent monitoring of project financing processes using blockchain technology. These technological advances improve investor confidence, reduce verification costs and could stimulate overall issuance volumes. To assess the impact of venture capital investments in AI and environmental sustainability on the volume of green bond issuance globally, an empirical study conducted over the period 2012-2021 shows that in the short term, these investments have an immediate and significant negative impact at the 5% threshold on green bond issuance. This impact became positive during the following three periods (quarters). In the long term, there is a negative structural effect of venture capital investments in AI and environmental sustainability on the volume of green bond issuance. This result suggests that AI has significant potential for the development of green finance, provided that these two areas do not compete in the long term to attract funds on the financial markets.

KEYWORDS:

Green finance, Sustainable bonds, Environmental sustainability, Artificial intelligence, Greenwashing, Blockchain.

INTRODUCTION:

Face à l'urgence climatique et aux défis écologiques qui s'imposent à l'échelle mondiale, la finance verte, en particulier, les obligations durables, émerge comme un levier stratégique pour adapter l'industrie financière aux exigences de nos sociétés contemporaines en orientant les flux financiers vers des projets durables et à vocation climatique et environnementale. Les obligations vertes (green bonds) jouent un rôle central dans cette dynamique en finançant des projets alignés sur des objectifs environnementaux durables, notamment, la lutte contre le changement climatique. Elles ont connu un essor rapide dans le sillage de l'Accord de Paris sur le climat (2015). Pour mieux encadrer ces instruments financiers, un cadre juridique international a été progressivement consolidé autour de normes telles que les "Green Bond Principles" (ICMA, 2021) et les règlements de l'UE (Taxonomie verte, "EU Green Bond Standard"), ainsi que les recommandations et directives de la "Climate Bonds Initiative".

A l'instar de différents domaines, l'introduction de l'intelligence artificielle (IA) dans la finance verte marque une transformation profonde. En effet, l'utilisation de l'IA comme outil innovant permet d'automatiser l'évaluation de l'éligibilité verte des projets, de surveiller les indicateurs ESG en temps réel, de détecter les risques de "greenwashing" et d'optimiser la transparence des obligations destinées au financement de ces projets. Ces apports technologiques pourraient favoriser une augmentation significative du volume global des émissions de "green bonds" dans le monde, en renforçant la confiance des investisseurs et en réduisant les coûts de certification.

PROBLEMATIQUE:

Dans quelle mesure l'intelligence artificielle favorise-t-elle l'augmentation du volume d'émissions d'obligations vertes à l'échelle mondiale, dans un cadre juridique international structuré et en évolution constante ?

Afin de fournir des éléments de réponse à cette question, nous allons scinder notre travail en trois parties, une première sera dédiée à une analyse du cadre juridique et conceptuel des obligations vertes, suivie d'une deuxième partie qui mettra la lumière sur l'apport de l'IA dans le développement de la finance verte à travers le monde, avant d'achever notre contribution par une étude empirique visant à quantifier l'impact des investissements en nouvelles technologies de l'IA sur la finance verte. Notre étude se basera sur des données trimestrielles couvrant une période de 10 ans, allant de 2012 à 2021. Lors de cette étude, nous allons considérer le volume d'émission des obligations vertes à travers le monde comme variable endogène, en le régressant sur le volume mondial des investissements en nouvelles technologies de l'IA pour cerner l'impact de ses investissements sur la finance verte.

Le choix de cette courte période est dicté par la disponibilité de données, surtout sur l'IA qui est une nouvelle grandeur.

I-FINANCE VERTE ET OBLIGATIONS DURABLES : CADRE JURIDIQUE ET CONCEPTUEL:

1.1. Cadre théorique et conceptuel :

Selon **Clapp et al.** (2012)¹, la finance verte est l'ensemble des activités financières visant à soutenir des projets ayant un impact environnemental positif. Dans leurs travaux, ces auteurs considèrent la finance verte comme une composante essentielle des stratégies de développement bas carbone. Ils insistent sur la nécessité de mobiliser les capitaux privés et publics pour financer des projets qui permettent de réduire les émissions de gaz à effet de serre tout en favorisant un développement durable. D'après cette définition, on peut déduire que la finance verte désigne l'ensemble des mécanismes financiers (prêts, investissements, assurances, obligations, etc) mobilisés pour financer des activités qui contribuent positivement à l'environnement. La finalité de ce type de financement est d'aligner les flux financiers avec les objectifs environnementaux, notamment la lutte contre le changement climatique et la protection de la biodiversité. Ce terme concerne, notamment :

- Le financement de projets d'énergie renouvelable (solaire, éolien, hydraulique),
- L'investissement dans l'efficacité énergétique,
- Le développement de technologies propres,
- La conservation des ressources naturelles,
- La gestion durable des déchets et de l'eau.

Plusieurs études académiques réalisées ont repris et enrichi cette définition. En effet, **l'OCDE (2015)** a défini la finance verte comme l'ensemble des services financiers qui favorisent une économie plus sobre en carbone et résiliente au climat². D'après **l'UNEP (2016)**, cette finance inclut également la gestion des risques environnementaux dans les décisions d'investissement et de financement³.

Quant aux obligations durables (sustainability bonds), « l'International Capital Market Association (ICMA) » en tant qu'organisme de référence à l'échelle internationale pour les standards volontaires dans le domaine des marchés obligataires durables, les définit comme des instruments de dette utilisés pour financer des projets liés à la durabilité environnementale, sociale ou de gouvernance (ESG). Ces instruments sont des titres de créance émis par des entreprises, des institutions financières ou des entités publiques dans le but de financer ou refinancer des projets qui présentent à la fois des bénéfices environnementaux et sociaux. On trouve dans ce cadre les obligations vertes (Green Bonds), les

¹ **Clapp, C., Briner, G., & Karousakis, K. (2012).** Low-emission development strategies (LEDS): Technical, institutional and policy lessons. OECD Publishing.

² Green Finance and Investment: Mapping Channels to Mobilise Institutional Investment in Sustainable Energy_ OECD (2015).

³ The Financial System We Need: From Momentum to Transformation_ UNEP Inquiry (2016).

obligations sociales (Social Bonds), les obligations de durabilité (Sustainability Bonds) et les obligations liées à la durabilité (Sustainability-Linked Bonds).

Ces titres qui sont des obligations classiques au sens juridique du terme, avec un coupon et une échéance, se caractérisent par la particularité que le produit de l'émission est affecté à un portefeuille de projets qui doivent répondre à des critères environnementaux (Réduction des émissions carboniques, Énergies renouvelables, Efficacité énergétique, Gestion durable de l'eau, Préservation de la biodiversité...) et sociaux (Accès aux soins de santé, Accès au logement social, Infrastructures éducatives, Programmes d'insertion sociale.....). Les obligations durables combinent les principes des obligations vertes et sociales (ICMA, 2023)¹.

Cet organisme a édicté des lignes directrices ci-après pour les émetteurs:

- "Green Bond Principles" (GBP) : pour les obligations vertes.
- "Social Bond Principles" (SBP) : pour les obligations sociales.
- "Sustainability Bond Guidelines" (SBG) : pour les obligations durables.

1.2. Cadre juridique international des obligations vertes:

La réglementation internationale dans le domaine de la finance verte est en expansion à différents niveaux. On site dans ce cadre, les Standards et principes volontaires internationaux et le Cadre réglementaire émergent. En effet, outre l'union européenne, d'autres juridictions comme la Chine, les États-Unis ou le Canada développent leurs propres cadres. De même, la Banque mondiale, le FMI et le G20 encouragent une harmonisation des standards ESG, via des initiatives comme la Task Force on Climate-Related Financial Disclosures (TCFD) ou les normes ISSB publiées en 2023 (IFRS S1 & S2). Cela crée un environnement juridico-financier plus structuré et favorable à l'expansion des obligations vertes.

A. Standards et principes volontaires :

a. "Green Bond Principles" (GBP) initiés par l'ICMA :

Ces principes qui constituent le cadre de référence principal pour les émetteurs, sont un ensemble de lignes directrices volontaires publiées par l'ICMA afin de promouvoir l'intégrité du marché des obligations vertes. Leur objectif est d'assurer que les obligations qualifiées de "vertes" financent des projets durables du point de vue environnemental, en instaurant les dimensions : transparence, traçabilité et redevabilité pour les émetteurs.

Selon l'édition 2023 des GBP, les émetteurs doivent se conformer à quatre piliers fondamentaux de ces principes, à savoir :

▪ **L'utilisation des fonds :** Les fonds levés doivent être exclusivement affectés à des projets verts clairement identifiés, tels que les énergies renouvelables (solaire, éolien, hydraulique), l'efficacité énergétique, les transports propres, la gestion durable de l'eau, l'adaptation au changement climatique et la préservation de la biodiversité

¹ Sustainability Bond Guidelines – Voluntary Process Guidelines for Issuing Sustainability Bonds_ ICMA (2023).

▪ **Les processus d'évaluation et de sélection des projets** : L'émetteur doit décrire le processus de sélection, incluant les critères d'éligibilité, les objectifs environnementaux poursuivis et le processus d'exclusion des projets non conformes.

▪ **La gestion des fonds** : Les produits de l'émission doivent être gérés de manière transparente (comptes dédiés ou systèmes de suivi internes) et audités si nécessaire.

▪ **Le reporting** : L'émetteur doit publier des rapports réguliers, au minimum annuels, incluant la liste des projets financés, le montant alloué à chaque projet et les impacts environnementaux.

Les GBP, qui sont aujourd'hui reconnus par les régulateurs financiers, les institutions multilatérales (Banque mondiale, BEI, AFD...) et les marchés obligataires internationaux, visent, notamment à harmoniser les pratiques de marché, à éviter le "Greenwashing" et à renforcer la crédibilité des obligations vertes auprès des investisseurs institutionnels.

Selon ICMA (2023), plus de 95 % des obligations vertes émises dans le monde suivent les GBP ou s'y réfèrent, le volume d'obligations vertes émises en 2023 dépasse les 600 milliards USD, en grande majorité alignées sur les GBP (Rapport "Climate Bonds Initiative", 2023).

b. "Climate Bonds Standard" (CBS) :

Développé par la "Climate Bonds Initiative" (CBI), labellisant les obligations compatibles avec l'Accord de Paris, le "Climate Bonds Standard" (CBS) est un cadre de certification international dédié à assurer que les obligations vertes financent des projets alignés avec l'objectif climatique de l'Accord de Paris, à savoir limiter le réchauffement à +1,5 °C. Ce cadre juridique est le seul standard international certifiant que les fonds mobilisés servent à financer des projets bas carbone, les projets contribuent à une transition vers une économie neutre en carbone et l'émetteur respecte des critères rigoureux définis pour chaque secteur économique.

Le CBS a comme objectifs tracés, fournir une certification indépendante de la conformité climatique des obligations vertes, accroître la confiance des investisseurs dans la qualité des projets financés et accélérer les flux de capitaux vers des infrastructures compatibles avec les objectifs de réduction des émissions (mitigation) et d'adaptation.

Ce cadre de certification international suit le processus suivant :

- Déclaration d'intention de l'émetteur.
- Vérification externe indépendante par un Verifier agréé (liste fournie par le CBI).
- Certification initiale sur la base de critères sectoriels stricts.
- Suivi post-émission avec rapport d'allocation et de performance environnementale.

Une fois certifiée, l'obligation reçoit le label "Climate Bond Certified", apposé sur les documents marketing, ce qui est en mesure de renforcer la transparence et l'intégrité des émissions, de la distinguer sur les marchés financiers ESG et de la reconnaître par plusieurs plateformes financières comme Bloomberg, Euronext ESG Bonds....

Pour être compatible avec l'Accord de Paris, Le CBS impose :

- Une cohérence stricte avec les scénarios de décarbonation de l'Agence internationale de l'énergie (AIE) et du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC).

- Une exclusion des énergies fossiles (charbon, gaz, pétrole), sauf exception pour certaines technologies de transition (avec limites).

- Une analyse du cycle de vie pour certaines catégories (bâtiments, transport).

Cela le distingue des simples Green Bond Principles (GBP) de l'ICMA, qui sont plus souples.

Le "Climate Bonds Standard" (CBS) constitue donc une référence robuste et scientifiquement fondée pour certifier que les obligations vertes financent des projets compatibles avec l'Accord de Paris. Sa rigueur technique, sa reconnaissance internationale et son exigence d'alignement climatique en font un outil de confiance pour les investisseurs, les émetteurs et les régulateurs cherchant à accélérer la transition bas carbone.

c. "SDG Bonds Guidelines" (Lignes directives):

Développés par les Nations Unies, en lien avec les ODD, les "SDG Bonds Guidelines" (Lignes directrices pour les obligations liées aux Objectifs de Développement Durable) sont un ensemble de principes volontaires édictés sous l'égide de l'ONU pour aider les émetteurs d'obligations à structurer, évaluer et rapporter sur des instruments de dette contribuant à la réalisation des Objectifs de Développement Durable (ODD/SDGs) de l'Agenda 2030.

Les "SDG Bonds Guidelines" se basent sur quatre principes clés, en l'occurrence :

- Alignement stratégique avec les ODD : L'émetteur doit démontrer comment les fonds levés via les obligations contribuent directement à des cibles précises des 17 ODD (par exemple : ODD 6 – eau propre, ODD 7 – énergie propre, ODD 13 – climat...).

- Utilisation des fonds ("Use of Proceeds") : Comme pour les obligations vertes, les ressources doivent être affectées à des projets à impact SDG clairement identifiés, en lien avec un ou plusieurs ODD.

- Mesure de l'impact et reporting SDG-aligned : L'émetteur s'engage à publier régulièrement des indicateurs de performance (KPI), tels que les tonnes de CO₂ évitées (ODD 13), le nombre d'emplois créés pour les femmes (ODD 5), le nombre de logements durables financés (ODD 11) et la vérification externe et normes complémentaires

Il est recommandé que les émissions soient vérifiées par des tiers et alignées avec les autres standards existants, comme les Green, Social, Sustainability Bonds Principles (ICMA) et les Climate Bonds Standards.

Les lignes directrices visent, notamment, à aligner les marchés financiers sur les ODD, en facilitant l'émission d'obligations thématiques durables, à éviter l'impact washing (équivalent de greenwashing pour les ODD) et à promouvoir la transparence et la mesurabilité des impacts sociaux, environnementaux et de gouvernance.

Les "SDG Bonds Guidelines" fournissent donc un cadre volontaire mais structurant pour que les émetteurs puissent mobiliser des capitaux en faveur du développement durable, tout en répondant aux exigences de transparence et de redevabilité des marchés financiers. Alignées sur l'Agenda 2030, ces lignes directrices permettent de canaliser l'épargne mondiale vers des investissements à impact social et environnemental mesurable.

B. Cadre réglementaire émergent :

Dans ce cadre, on peut citer les cadres ci-après :

a. La taxonomie verte européenne (EU Taxonomy) :

C'est un système de classification réglementaire qui vise à déterminer quelles activités économiques peuvent être considérées comme "durables" d'un point de vue environnemental, dans le cadre du Green Deal européen. Etablie formellement par le Règlement (UE) 2020/852 du Parlement européen et du Conseil du 18 juin 2020, aussi appelé "Taxonomy Regulation", la taxonomie verte européenne a pour objectifs :

- Lutter contre l'écoblanchiment (greenwashing) en fournissant une base scientifique commune;
- Orienter les investissements privés et publics vers des activités économiques compatibles avec les objectifs climatiques de l'UE;
- Améliorer la transparence et la comparabilité des investissements ESG;
- Soutenir les obligations vertes, les crédits durables et les rapports extra-financiers (CSRD, SFDR).

Cette taxonomie classe les activités durables selon les six objectifs environnementaux (European Commission, 2020) ci-après :

- Atténuation du changement climatique.
- Adaptation au changement climatique.
- Utilisation durable et protection de l'eau
- Transition vers une économie circulaire.
- Prévention et contrôle de la pollution.
- Protection et restauration de la biodiversité.

Pour qu'une activité soit taxonomiquement "durable", elle doit contribuer substantiellement à l'un des 6 objectifs cités plus haut, ne pas nuire de manière significative aux autres objectifs et respecter les garanties sociales minimales (droits humains, droit du travail – OIT, OCDE).

La taxonomie verte européenne constitue donc le socle réglementaire central de la finance durable en Europe. Elle oriente les capitaux vers les secteurs compatibles avec la neutralité carbone à l'horizon 2050, tout en protégeant la biodiversité et la santé humaine. Elle renforce également la crédibilité des obligations vertes, en imposant des critères de durabilité

uniformes, transparents et scientifiques. Cette taxonomie s'applique notamment aux établissements financiers (banques, assureurs, gestionnaires d'actifs) dans le cadre du règlement SFDR, aux entreprises soumises à la CSRD (Corporate Sustainability Reporting Directive) dès 2024, aux émetteurs d'obligations vertes européennes (via le EU Green Bond Standard) et aux États membres pour la labellisation des dépenses publiques "vertes".

b. "EU Green Bond Standard" (EUGBS):

Le "EU Green Bond Standard" (EUGBS) est un règlement européen adopté officiellement en octobre 2023, et entré en vigueur en 2024, qui crée un cadre légal unique et volontaire pour l'émission d'obligations vertes dans l'Union européenne. Il vise à établir un label officiel européen pour les obligations vertes conformes à la taxonomie verte de l'UE (Règlement UE 2020/852), afin de renforcer la crédibilité du marché et de lutter contre le greenwashing.

Ce règlement a pour buts de créer un label officiel "obligation verte européenne" accessible aux émetteurs publics et privés, renforcer la transparence, la comparabilité et la crédibilité du marché des obligations vertes, aligner les obligations vertes sur la taxonomie européenne, protéger les investisseurs contre le greenwashing et favoriser les investissements verts transfrontaliers.

Parmi les principales exigences du EUGBS on note :

-L'utilisation des fonds ("Use of Proceeds") : Les fonds levés doivent être entièrement alloués à des activités économiques durables définies par la taxonomie européenne comme les énergies renouvelables, la rénovation de bâtiments, la mobilité propre, l'hydrogène bas carbone et la protection de la biodiversité.

-Le plan de répartition (allocation plan) : L'émetteur doit publier un plan clair d'affectation des fonds, accompagné d'une description des projets, de critères d'éligibilité et d'un échéancier d'utilisation.

-Les rapports obligatoires (reporting) : Deux rapports doivent être publiés, à savoir le rapport d'allocation (Allocation Report) qui indique comment les fonds ont été utilisés, et le Rapport d'impact environnemental (Impact Report) qui évalue les bénéfices environnementaux.

-Vérification externe obligatoire : Les obligations labellisées "EU Green Bonds" doivent être vérifiées par un "relecteur externe" agréé (external reviewer), supervisé par l'ESMA. Ces auditeurs doivent être enregistrés officiellement.

L'EUGBS représente une avancée historique dans la réglementation des marchés financiers durables. En rendant juridiquement contraignants les principes d'alignement sur la taxonomie, de transparence, de traçabilité et de vérification, il établit une norme de qualité

supérieure. Cela pourrait devenir un référentiel mondial, inspirant d'autres juridictions (Chine, ASEAN, USA) à renforcer leur propre cadre.

c. "Securities and Exchange Commission_SEC" (États-Unis):

La "Securities and Exchange Commission" est l'autorité fédérale américaine de régulation des marchés financiers. Elle supervise la transparence, la conformité et la protection des investisseurs dans les marchés de capitaux américains. Depuis 2021, sous l'administration Biden, la SEC a renforcé son attention sur les questions ESG (*Environmental, Social and Governance*), avec pour objectif d'encadrer la communication extra-financière des entreprises cotées, en particulier sur les risques climatiques.

L'accélération du débat réglementaire aux États-Unis est dictée par la croissance rapide de l'investissement ESG. Dans ce contexte, la SEC a exprimé certaines inquiétudes concernant la question du "greenwashing", le manque de standardisation des rapports ESG et l'absence de critères harmonisés sur les fonds dits "durables". En réponse, cette instance a lancé une série d'initiatives réglementaires dès 2021, culminant par des projets de réglementation formels en 2022 et 2023.

Le renforcement des exigences ESG a suscité aussi bien des soutiens, notamment, de la part des grands investisseurs institutionnels comme BlackRock et State Street qui y voient un moyen d'améliorer la transparence et la comparabilité, que des oppositions juridiques et politiques. Dans ce cadre, des États comme le Texas ou la Floride ont attaqué la SEC pour atteinte à la liberté d'entreprise. De même, des groupes industriels, notamment dans les énergies fossiles, craignent des coûts de conformité élevés. Ce climat a provoqué plusieurs poursuites judiciaires contre la SEC fin 2023 et début 2024.

La SEC est engagée dans une réforme majeure visant à standardiser la divulgation ESG aux États-Unis. Bien que ces initiatives soient encore débattues, elles marquent un tournant historique vers une régulation plus stricte et compatible avec les efforts internationaux (comme la directive européenne CSRD, l'EUGBS ou les ISSB Standards). La dynamique américaine, bien que controversée, pourrait à terme renforcer la convergence réglementaire mondiale en matière de finance durable.

d. "Green Bond Endorsed Project Catalogue-GBEPC" (Chine):

La Chine est aujourd'hui l'un des plus grands émetteurs mondiaux d'obligations vertes, avec une stratégie volontariste en matière de transition écologique et de finance durable. Pour garantir l'intégrité du marché, la Banque Populaire de Chine (PBoC) a instauré un cadre de classification des projets éligibles aux obligations vertes à travers le GBEPC.

Élaborée initialement en 2015, par la PBoC en collaboration avec le "National Development and Reform Commission" (NDRC) et Adoptée officiellement le 1^{er} juillet 2021, Le GBEPC est un catalogue officiel de projets verts que les émetteurs doivent utiliser pour justifier l'utilisation des fonds levés via des obligations vertes en Chine. Ce catalogue sert de

référence obligatoire pour les banques, les entreprises d'État et les émetteurs sur le marché obligataire national chinois.

Ce catalogue qui vise à fournir une taxonomie nationale des projets écologiques, à réduire le greenwashing en imposant une liste stricte des projets finançables, à améliorer la transparence des émissions vertes en Chine et à harmoniser progressivement les standards chinois avec ceux de la finance durable internationale, s'inscrit aujourd'hui dans un effort de convergence avec les standards mondiaux, notamment le "Green Bond Principles" (ICMA), Le "Climate Bonds Standard" (CBI) et la taxonomie verte européenne.

Le "Green Bond Endorsed Project Catalogue" est un outil central dans la stratégie chinoise de développement de la finance verte. Depuis 2021, il marque un tournant qualitatif vers l'exclusion des projets fossiles et l'alignement avec les standards mondiaux. Ce catalogue contribue non seulement à structurer le marché obligataire vert chinois, mais aussi à favoriser l'interopérabilité réglementaire avec l'Europe et les marchés internationaux.

II-APPORT DE L'IA A LA FINANCE DURABLE AU MONDE:

2.1. Domaines d'application :

L'IA représente une opportunité stratégique pour renforcer l'efficacité de la finance verte, la transparence des projets et l'optimisation des investissements durables, en facilitant l'évaluation automatisée des projets verts, l'analyse sémantique des rapports ESG pour détecter les cas de "greenwashing" et la notation climatique sur la base de données satellitaires, ainsi que le suivi et l'audit des obligations à travers les "Smart contracts" et "blockchain". Par le biais du traitement du Big data, ces nouvelles technologies permettent, également, d'analyser des données climatiques, géospatiales ou énergétiques pour anticiper les risques liés aux catastrophes naturelles ou à la transition énergétique. Ces analyses aident les investisseurs à mieux intégrer les critères ESG (Environnement, Social, Gouvernance).

a. Évaluation automatisée des projets verts :

L'évaluation des projets pour déterminer s'ils répondent effectivement aux critères de durabilité (ESG) constitue une étape clé dans le domaine de la finance verte. Auparavant, cette évaluation est réalisée manuellement par des experts, ce qui peut ralentir le processus de validation et le rend coûteux et sujet à des biais. Grâce à l'IA, l'évaluation de ces projets se fait de manière automatisée en incluant l'analyse des données techniques et financières du projet, la vérification de la conformité aux normes et l'évaluation des impacts environnementaux et sociaux.

En effet, le "machine learning" qui est une branche de l'IA, permet, par le biais d'algorithmes capables d'apprendre automatiquement à partir de données, sans programmation explicite, d'analyser de grandes quantités de données complexes liées aux projets, de prédire la durabilité ou le risque ESG d'un projet sur la base de patterns identifiés dans des bases historiques et de procéder à une évaluation plus rapide, standardisée et potentiellement plus objective.

Dans ce cadre, **Zhang et al.** (2022)¹ ont exploré l'usage de techniques de "machine learning" pour automatiser l'évaluation des projets verts, dans l'objectif de développer un modèle ML capable d'analyser des données hétérogènes (rapports financiers, données climatiques, description des projets) pour classer automatiquement un projet comme "vert" ou "non vert". Ces chercheurs qui ont utilisés différents algorithmes, ont effectué des entraînements sur un jeu de données labellisé contenant des projets certifiés verts et non verts.

D'après les résultats de cette recherche, les modèles ML ont obtenu une précision qui dépasse 85 % pour l'évaluation automatisée, en permettant de détecter des incohérences et possibles cas de "greenwashing". De même, le système a réduit significativement le temps d'évaluation et les coûts associés.

L'IA permet donc une automatisation de la conformité avec les normes ESG et une accélération du processus d'émission pour les émetteurs d'obligations vertes et une meilleure supervision et détection des fraudes ou abus pour les régulateurs, comme elle constitue un outils d'analyse plus fiables et transparents, ce qui est en mesure de réduire le risque d'investissement dans des projets non durables pour les investisseurs.

b. Analyse sémantique automatisée des rapports ESG:

Le "greenwashing" désigne la pratique par laquelle une entité communique, de manière trompeuse, des rapports sur ses engagements environnementaux, sociaux ou de gouvernance (ESG), détaillant leurs actions, résultats et engagements, pour apparaître plus responsable qu'elle ne l'est réellement. Ces rapports, souvent longs et complexes, peuvent contenir des formulations vagues, exagérées, voire fallacieuses.

Pour détecter les cas de "greenwashing", des techniques ont été développées comme l'analyse sémantique automatisée utilisé par **Berg et al.** (2020)² pour scruter un grand nombre de rapports ESG d'entreprises cotées. Cet outil issu du traitement automatique du langage naturel (NLP) vise à comprendre le sens des textes en analysant la structure des phrases, les relations entre mots, le contexte des expressions et la cohérence et la pertinence des informations.

Grace à cet outil, **Berg et al.** ont extrait et quantifié les termes, expressions et formulations relatifs aux engagements ESG, avant de comparer ces contenus avec des indicateurs objectifs de performance ESG (données d'impact environnemental, sanctions, audits externes). L'étude de ces chercheurs a détecté des incohérences ou exagérations dans le discours et une proportion significative de rapports ESG qui présente des signes révélateurs de "greenwashing". L'analyse sémantique a permis donc de détecter automatiquement ces cas avec un haut degré de précision allant jusqu'à 80-90 % dans certains tests.

¹ Automated Evaluation of Green Projects Using Machine Learning Techniques_ Zhang, H., Li, Y., & Wang, J. (2022).

² Berg, F., Kölbel, J. F., & Rigobon, R. (2020). Aggregate Confusion: The Divergence of ESG Ratings.

L'analyse sémantique automatisée est bénéfique aussi bien pour le marché que pour les régulateurs. Ainsi, cette technique qui peut être intégrée dans les processus de contrôle des divulgations ESG, permet d'éviter d'investir dans des entreprises surfant sur une image verte trompeuse et encourage la transparence réelle et la rigueur dans la communication.

c. Notation climatique dynamique par l'IA sur la base des données satellitaires:

La notation climatique désigne l'évaluation du risque climatique et de la performance environnementale des entreprises, projets ou portefeuilles financiers. Elle vise à fournir aux investisseurs et aux régulateurs des indicateurs synthétiques pour guider leurs décisions. Traditionnellement, ces notations reposent sur des données déclaratives fournies par les entreprises (rapports ESG) ou des données statistiques historiques, qui peuvent être peu fréquentes, partielles ou biaisées.

Les données, que ce soient satellitaires (*images et mesures en temps quasi réel concernant la couverture forestière, les émissions de gaz à effet de serre, la pollution de l'air, le changements d'usage des sols*), énergétiques (*consommation, production d'énergie, mix énergétique, efficacité énergétique, sources renouvelables vs fossiles*) ou climatiques (*température, précipitations, inondations, sécheresses, tendances de changement climatique...*), offrent une vision objective, actualisée et granulaire de la réalité environnementale.

L'IA permet de collecter ces données hétérogènes de manière automatisée et de les traiter massivement et en grande quantité, extraire des patterns complexes non visibles à l'œil humain comme les corrélations spatiales et temporelles et produire une notation dynamique qui évolue en temps réel ou presque, reflétant les changements récents.

d. "Smart contracts" et "blockchain" pour le suivi et l'audit des obligations:

Généralement, les obligations durables, notamment les obligations vertes, sont destinées à financer des projets ESG. Pour garantir la transparence et la crédibilité, il est crucial d'assurer un suivi rigoureux de l'utilisation des fonds qui en découlent et un audit indépendant des résultats (Huang et al., 2021). Cependant, les méthodes classiques reposent souvent sur des rapports périodiques manuels, parfois sujets à retard, d'erreurs ou de manipulation.

L'IA permet d'automatiser ces tâches grâce aux techniques de "Blockchain" (*Un registre numérique décentralisé, immuable et transparent, qui enregistre toutes les transactions de manière sécurisée et horodatée*) et "Smart contracts" (*Un programmes informatiques auto-exécutables stockés sur une "blockchain", qui s'exécutent automatiquement lorsque des conditions prédéfinies sont remplies*).

Ainsi, les "smart contracts" peuvent être conçus pour gérer automatiquement la libération des fonds en fonction de la réalisation d'étapes prédéfinies. Chaque transaction est enregistrée sur la "blockchain", assurant la traçabilité et la transparence en temps réel. L'analyse des données de ces outils rend l'audit partiellement automatisé et plus fiable, de façon à ce que l'historique complet et immuable des flux financiers et des données d'impact

est devenu facilement accessible aux auditeurs et investisseurs. De même, la blockchain réduit les risques de fraude, d'erreur, ou de manipulation des données,

Dans leur recherche, **Huang et al. (2021)**¹ ont développé un cadre utilisant la "blockchain" et les "smart contracts" pour assurer la conformité réglementaire des obligations durables, automatiser la vérification des critères ESG via l'intégration de données externes (bases de données publiques) et faciliter un "reporting" en temps réel vers les parties prenantes. Leurs résultats montrent une amélioration significative de la confiance des investisseurs et une réduction des coûts d'audit.

2.2. Avantages de l'IA:

L'émission d'obligations vertes requiert une transparence rigoureuse et un suivi environnemental fiable pour garantir la crédibilité des projets financés. Dans ce contexte, l'intelligence artificielle s'impose comme un levier d'innovation essentiel qui permet une réduction des asymétries d'information, l'automatisation des "reportings" et la vérification post-émission, l'accélération du processus d'émission, ainsi qu'une meilleure traçabilité environnementale des fonds. Ces atouts technologiques renforcent non seulement l'efficacité du marché des obligations vertes, mais aussi la confiance des investisseurs en la qualité et la durabilité des projets soutenus.

a. Réduction des asymétries d'information:

Une asymétrie d'information survient lorsqu'une partie à une transaction possède plus ou de meilleures informations que l'autre, ce qui peut entraîner des décisions non optimales, des problèmes de sélection adverse et des risques d'aléa moral (comportements opportunistes après la transaction). Dans le domaine des obligations durables, asymétries d'information peuvent concerner la qualité réelle des projets financés, la sincérité des rapports ESG ou la gestion des fonds.

L'IA, via ses capacités d'analyse et de prédiction avancées, peut réduire ces asymétries par l'analyse automatisée et exhaustive des données financières, ESG, climatiques, ou de marché, souvent volumineuses et complexes, le traitement du langage naturel pour extraire des informations clés des rapports, communiqués et médias, la détection d'anomalies et fraudes via des modèles prédictifs, la notation dynamique des émetteurs ou projets basée sur des données en temps réel et la personnalisation de l'information pour les investisseurs, avec des alertes et recommandations fondées sur les profils de risque.

L'utilisation de l'IA dans la finance verte permet donc de garantir une transparence accrue sur les projets et émetteurs, une réduction du risque lié à une mauvaise information, un renforcement de la confiance dans les marchés financiers durables et une amélioration de l'efficacité des marchés.

¹ Huang, Z., Wang, J., & Chen, L. (2021). *Blockchain-enabled smart contracts for green bond management: Transparency and automation.*

b. Automatisation des "reportings" et vérifications post-émission:

Les obligations vertes sont dédiées à financer des projets ayant un impact positif sur l'environnement. Après leur émission, les émetteurs doivent assurer un "reporting" transparent et régulier sur l'utilisation des fonds générés par cette émission et les résultats environnementaux obtenus, afin de rassurer les investisseurs et les régulateurs.

Le "reporting" post-émission consiste en la collecte de données sur les projets financés, la production de rapports périodiques (*annuels, semestriels...*) et la vérification de la conformité aux critères ESG. A ce stade intervient l'IA pour automatiser, fiabiliser et accélérer ce processus par la génération de rapports clairs, standardisés et conformes aux exigences réglementaires et ce selon les étapes suivantes :

- La collecte et l'intégration automatisée des données provenant de sources multiples (*Bases de données publiques, les images satellites et les documents officiels...*) et leur traitement.
- L'analyse et la génération de rapports à travers une synthèse automatique des indicateurs de performance environnementale et la détection des anomalies, incohérences ou risques potentiels.
- Les vérifications et audits automatisés via le contrôle automatisé de la conformité des dépenses et résultats aux critères verts définis et la détection de signaux faibles ou de possibles fraudes comme le "greenwashing" par analyse des données historiques et comparatives.

L'introduction de l'IA dans ce processus permet donc un gain de temps et une réduction des coûts humains liés à la production et vérification des rapports, une fiabilité accrue grâce à la réduction des erreurs manuelles et subjectivités et une transparence renforcée pour les investisseurs et régulateurs, ainsi qu'une actualisation plus rapide des informations, permettant des décisions plus éclairées.

c. Accélération du processus d'émission :

L'émission d'une obligation verte implique plusieurs étapes complexes et chronophages, notamment, la collecte et la vérification des données ESG relatives au projet, la due diligence et l'évaluation des risques environnementaux et financiers, la préparation du cadre d'émission conforme aux standards internationaux (*Green Bond Principles, Taxonomie européenne, etc.*), la rédaction des documents d'offre, prospectus et "reporting" anticipé et la coordination entre différents acteurs (*émetteurs, banques, agences de notation, régulateurs, investisseurs*).

Ce processus peut durer plusieurs semaines voire mois, d'où l'importance de l'utilisation de l'IA pour accélérer ce processus. En effet, cet outil technique permet:

Une Automatisation de la collecte et de la validation des données : L'IA peut extraire et valider automatiquement les données ESG issues de diverses sources, réduisant ainsi le temps de collecte manuelle. De même, les algorithmes de traitement du langage naturel (NLP) analysent rapidement les documents juridiques, réglementaires et techniques nécessaires à l'émission.

Une analyse prédictive et une évaluation des risques : L'IA permet d'évaluer plus rapidement et précisément les risques liés au projet (environnementaux, financiers, de réputation) via des modèles prédictifs. Ceci facilite la prise de décision et l'optimisation du profil de risque de l'obligation.

Une génération automatique des documents et conformité : Les "smart contracts" et systèmes automatisés rédigent et vérifient la conformité des documents (*prospectus*, *contrats*) avec les normes internationales, ce qui accélère les phases juridiques. La conformité aux standards ESG peut être validée en temps réel.

Une facilitation de la communication avec les investisseurs : Les plateformes basées sur l'IA offrent des interfaces interactives pour présenter rapidement les caractéristiques et garanties de l'obligation aux investisseurs potentiels, accélérant ainsi la souscription.

Grâce à l'utilisation de l'IA, on a observé une réduction significative du délai entre le lancement et la clôture de l'émission (de plusieurs semaines à quelques jours), une diminution des coûts liés aux tâches répétitives et manuelles et une meilleure qualité des données et documents émis, ce qui augmente la confiance des investisseurs.

d. Meilleure traçabilité environnementale des fonds :

La traçabilité environnementale des fonds est la capacité à suivre, à documenter et à vérifier que les fonds levés sont alloués exclusivement à des projets conformes aux engagements environnementaux initiaux. Malgré l'essor des obligations vertes dans le monde, leur crédibilité est parfois remise en question, notamment à cause du "greenwashing" ou d'un manque de transparence post-émission, d'où la nécessité de penser à une solution qui permet de surmonter ce défi. C'est à l'intelligence artificielle de jouer ce rôle.

En effet, L'IA en tant qu'outil d'aide à la décision, d'automatisation et d'analyse, joue un rôle central pour réduire les frictions administratives, accroître la transparence et garantir que les capitaux mobilisés par les obligations vertes sont effectivement utilisés pour des projets ayant un impact environnemental mesurable, vérifiable et transparent. L'IA est ici présentée comme un levier technologique capable de renforcer la traçabilité, la crédibilité et la transparence des financements verts.

De sa capacité de collecter des données en temps réel depuis des sources variées, L'IA permet de détecter les incohérences entre les engagements de l'émetteur et les résultats mesurés et d'alerter automatiquement en cas de dérive ou de mauvaise allocation des fonds. Elle permet donc de **modéliser le cycle de vie complet des projets financés** et d'anticiper les impacts environnementaux. Ces nouvelles technologies sont capables d'assurer un **suivi dynamique et une cartographie des flux financiers**, en traçant et en analysant la **chaîne complète d'allocation des fonds** du point d'émission jusqu'à la réalisation effective du projet.

En rendant possible un suivi rigoureux, automatisé et dynamique des fonds alloués aux projets verts, l'IA contribue donc à fiabiliser le marché des obligations vertes, à en élargir l'accès et à mieux aligner les flux financiers avec les objectifs climatiques mondiaux.

III-IMPACT DES INVESTISSEMENTS EN IA SUR L'EMISSION DES OBLIGATIONS VERTES/ ETUDE EMPIRIQUE:

3.1-Contexte de l'étude:

A l'instar de différents domaines, l'introduction de l'intelligence artificielle (IA) dans la finance verte marque une transformation profonde. En effet, les apports de l'utilisation de l'IA comme outil innovant pourraient favoriser une augmentation significative du volume global des émissions de "green bonds" dans le monde, en renforçant la confiance des investisseurs et en réduisant les coûts de certification. Ce constat nous pousse à réaliser cette étude dans le but de quantifier la contribution des investissements en IA dans l'essor des obligations vertes à l'échelle mondiale.

3.2-Démarche suivie:

Notre étude repose sur des données trimestrielles couvrant une période de dix ans, allant de 2012 à 2021. Le choix de cette période relativement courte s'explique principalement par la disponibilité limitée des données, en particulier celles relatives à l'intelligence artificielle, qui demeure un phénomène émergent et récent dans la sphère économique.

Dans ce travail, nous considérons le volume d'émission des obligations vertes à l'échelle mondiale comme variable endogène, que nous régressons sur le volume des investissements mondiaux en capital-risque dans l'intelligence artificielle et la durabilité environnementale. Pour modéliser cette relation, nous estimons un modèle autorégressif à retards échelonnés (ARDL), qui combine les caractéristiques des modèles autorégressifs (AR) et des modèles à retards distribués (DL). Ce cadre économétrique nous permet d'analyser à la fois les effets de court terme et les relations de long terme entre les deux variables, et d'évaluer l'impact des investissements en IA et durabilité environnementale sur le développement du marché des obligations vertes à l'échelle mondiale.

Les données concernant l'émission des obligations vertes sont extraites de la base de données du fond monétaire international (IMF), alors que celle relatives aux investissements en IA sont puisées de la base de données de l'OCDE, via son site officielle "www.oecd.ai".

3.3-Présentation des variables :

Variables	Désignation	Fréquence
GB	Volume d'émission des obligations en milliards USD	Annuelle
IA	Investissements mondiaux de capital-risque dans l'IA et la durabilité environnementale en milliards USD	Trimestriel

Afin d'enrichir notre base de données et d'améliorer la robustesse de notre analyse économétrique, nous avons procédé à une opération de conversion de la fréquence de la

variable GB, initialement exprimée en données annuelles, vers une fréquence trimestrielle. Cette transformation vise non seulement à augmenter le nombre d'observations disponibles, ce qui permet une meilleure précision dans l'estimation des relations dynamiques entre les variables, mais également à harmoniser la dimension temporelle des deux variables étudiées, à savoir GB et IA, afin de faciliter les comparaisons et garantir la cohérence du modèle économétrique.

Pour ce faire, nous avons utilisé la méthode de passage de basse à haute fréquence ("Low to High Frequency Conversion"). Cette méthode permet de désagréger une série temporelle annuelle en une série trimestrielle à l'aide de techniques d'interpolation, tout en respectant la structure statistique de la série d'origine. Plusieurs options sont disponibles dans le logiciel Eviews pour effectuer cette conversion, telles que l'interpolation linéaire, quadratique ou par mouvement exponentiel. Dans notre cas, une interpolation linéaire a été retenue, car elle assure une transition progressive, cohérente et réaliste entre les observations annuelles.

Variables	Désignation	Fréquence
GBT	Volume d'émission des obligations en milliards USD	Trimestriel
IA	Investissements mondiaux de capital-risque dans l'IA et la durabilité environnementale en milliards USD	Trimestriel

Ce traitement nous permet ainsi de travailler avec une granularité temporelle plus fine, nécessaire pour capter les fluctuations de court terme, améliorer la précision des estimations économétriques et garantir une meilleure comparabilité entre les deux variables.

3.4-Etude de stationnarité des variables:

La modélisation des séries temporelles exige que celles-ci soient stationnaires, c'est-à-dire qu'elles ne présentent ni tendance, ni cycle, ni composante saisonnière. La stationnarité constitue en effet une condition fondamentale en économétrie des séries temporelles, dans la mesure où l'estimation de modèles à partir de séries non stationnaires peut entraîner des résultats fallacieux, en donnant lieu à des régressions non valides.

Par ailleurs, étant donné que notre étude repose sur des données trimestrielles, il est nécessaire de tester la présence d'éventuelle saisonnalité. Cette composante peut fausser les résultats si elle n'est pas prise en compte, car elle introduit une structure répétitive dans les données à intervalles réguliers. Pour ce faire, nous avons choisi d'appliquer la méthode **ANOVA (Analysis of Variance)**, qui permet de détecter statistiquement une structure saisonnière répétitive en comparant les moyennes des différentes périodes (trimestres). Ce test fournit ainsi un outil pertinent pour identifier et traiter toute composante saisonnière avant la modélisation.

Tableau 1: Résultat des Tests de l'influence du facteur «Trimestre» par ANOVA

ANOVA								
Variab le	Source of Variation	SS	Df	MS	F	P- value	F critiqu e	Résultat
GBT	Columns (Q1, Q2, Q3, Q4)	0,914 8	3	0,304 9	11,04 66	6,55E -05	2,9603	la série est saisonnière
IA	Columns (Q1, Q2, Q3, Q4)	3,994 1	3	1,331 3	0,928 8	0,440 2	2,9603	la série n'est pas saisonnière

Source : réalisé par nos soins avec le logiciel Eviews 12

Après avoir détecté la présence d'une composante saisonnière dans l'une de nos séries temporelles, il devient nécessaire de procéder à un ajustement de la saisonnalité. Pour cela, nous avons opté pour la méthode des moyennes mobiles, qui est une technique classique et efficace d'ajustement. Cette méthode consiste à lisser les fluctuations saisonnières en calculant des moyennes centrées sur plusieurs périodes consécutives, permettant ainsi d'extraire la tendance sous-jacente de la série.

À la suite de cet ajustement, la série initiale **GBT** a été transformée pour devenir **GBTSA**, une série corrigée de la saisonnalité qui sera utilisée avec la série **IA** dans les étapes ultérieures de notre étude, notamment pour les tests de stationnarité.

Tableau 2: Résultat du Test ADF

Variabl es	Désignation	Type de Processus	Fréquen ce	Degré intégratio n
GBTSA	Volume d'émission des obligations en milliards USD	Stationnaire	Trimestriel	I(0)
IA	Investissements mondiaux en capital-risque dans l'IA et la durabilité environnementale en milliards USD	DS sans dérive	Trimestriel	I(1)

Source : réalisé par nos soins avec le logiciel Eviews 12

3.5-Modélisation économétrique:

Dans le cadre de notre étude, nous estimons un modèle ARDL qui est adapté à l'étude des relations dynamiques entre des variables intégrées d'ordres différents (I(0) et I(1)).

L'approche ARDL permet ainsi d'identifier à la fois les effets de court terme et les relations d'équilibre à long terme entre les variables.

Dans notre cas, l'application de ce modèle nous permettra d'analyser les liens dynamiques potentiels et les effets significatifs entre les variables **GBTSA** et **IA** pour mieux comprendre l'influence de l'investissement dans l'intelligence artificielle sur le volume d'émission des obligations vertes, tout en tenant compte de la structure temporelle des données.

3.5.1-Spécification du modèle :

$$d(LGBT) = a_0 + \sum_{i=1}^p a_{1i}d(LGBT) + \sum_{i=0}^q a_{2i}d(LIA) + b_1LIA + e_t$$

Avec a_0 constante, a_1, a_2 effets à court terme, b_1 dynamique de long terme, $e \sim iid(0, \sigma)$ terme d'erreur (bruit blanc).

3.5.2-Paramètre du modèle:

La détermination des paramètres du modèle ARDL exige l'identification du retard optimal (pour déterminer les valeurs de q et p dans l'équation ci-dessus). Afin d'éviter toute mauvaise spécification de la dimension des modèles. À cette fin nous utiliserons le nombre de retards qui minimise le critère d'information d'Akaike (AIC). Celui qui offre des résultats statistiquement significatifs avec les moins des paramètres. Le modèle optimal sera celui qui présente la valeur de AIC minimale. Dans notre cas, le modèle **ARDL (2, 4)** correspond à la plus petite valeur de AIC (-3.2186) parmi les 20 modèles testés. Cette modélisation donne lieu à la sortie Eviews suivante :

Tableau 3 : Résultats de l'estimation du modèle

ARDL(2, 4)				
Variable	Coefficient t	Std. Error	t-Statistic	Prob.*
GBTSA(-1)	1.214995	0.147240	8.251806	0.0000
GBTSA(-2)	-0.258986	0.139631	-1.854795	0.0738
DIA	-0.014170	0.007962	-1.779733	0.0856
DIA(-1)	-0.030910	0.008051	-3.839330	0.0006
DIA(-2)	-0.024052	0.008236	-2.920484	0.0067
DIA(-3)	-0.040718	0.008637	-4.714154	0.0001
DIA(-4)	-0.017960	0.009202	-1.951848	0.0607

C	0.598610	0.128671	4.652240	0.0001
R-squared	0.998749	Mean dependent var		11.82487
Adjusted R-squared	0.998447	S.D. dependent var		1.117631
S.E. of regression	0.044039	Akaike info criterion		- 3.218689
Sum squared resid	0.056243	Schwarz criterion		- 2.870382
Log likelihood	67.54574	Hannan-Quinn criter.		- 3.095894
F-statistic	3308.191	Durbin-Watson stat		2.206798
Prob(F-statistic)	0.000000			

Source : réalisé par nos soins avec le logiciel Eviews 12

Le modèle ARDL estimé est globalement bon, comme le montrent les valeurs obtenues des $R^2=0.99$ très proche de 1, la Probabilité (F-statistic) est largement inférieure à 0,05, ce qui indique que le modèle est statistiquement bon dans sa globalité, absence d'autocorrélation d'ordre 1: $DW \approx 2$. Avant d'entreprendre le test de cointégration, il est essentiel d'évaluer le modèle à travers plusieurs tests de validation. Ceux-ci permettent d'évaluer la robustesse du modèle et la pertinence des résultats obtenus.

3.5.3-Les tests de robustesse du modèle :

Afin de garantir la fiabilité des estimations, plusieurs tests de robustesse ont été effectués, notamment les tests d'autocorrélation, d'hétéroscédasticité, de normalité des erreurs et de spécification du modèle.

Tableau 4 : Tests de robustesse du modèle

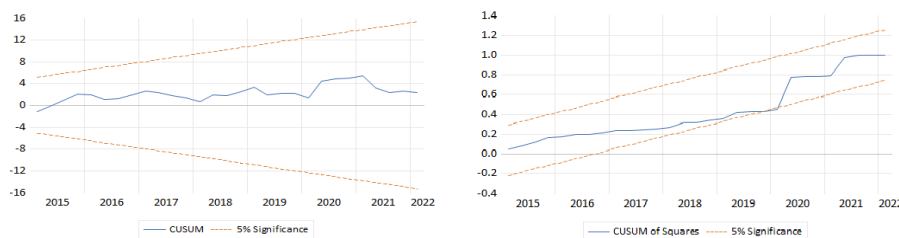
Tests de validité et de stabilité	Prob	Interprétations
Breusch-Godfrey Serial Correlation LM Test	0.2919	L'Absence d'autocorrélation des erreurs
Heteroskedasticity Test: Breusch-Pagan-Godfrey	0.4818	Les erreurs sont homoscédastiques
Normality Test – Jarque-Bera	0.7659	Les erreurs sont normalement distribuées
Ramsey RESET Test	0.7888	Le modèle est stable et bien spécifié

Source : réalisé par nos soins avec le logiciel Eviews 12

3.5.4-Test de stabilité : CUSUM et CUSUMSQ :

En plus de tous les tests de validité précédents, il est essentiel de réaliser le test de stabilité des coefficients de la dynamique à court terme pour évaluer la stabilité des coefficients à long terme. À cet égard, Pesaran propose l'utilisation des tests de la somme cumulative des résidus récurrents (CUSUM) et de la somme cumulative des résidus récurrents au carré (CUSUMSQ) sur le modèle à correction d'erreur. Dans notre test, il est clair que les sommes cumulées des écarts se trouvent à l'intérieur de l'intervalle de confiance avec 5% de significativité, donc le modèle demeure stable au fil du temps (figure 1).

Figure 1 : Résultats des tests de stabilité CUSUM et CUSUMS



Source : réalisé par nos soins avec le logiciel Eviews 12

Le modèle ARDL estimé est donc globalement bon, comme le montrent les valeurs obtenues des R^2 , qui explique à 99% la dynamique des variables étudiées. Concernant les tests de diagnostic, on peut dire que nous sommes devant un modèle qui remplit toutes les conditions de validation notamment la non autocorrélation des erreurs, la normalité des erreurs, l'homoscédasticité et il est bien spécifié au seuil de 5%.

3.5.5-Le test de cointégration de « Bounds test » :

La procédure consiste à effectuer un test de cointégration aux bornes selon la méthode de Pesaran (2001), ce test exige que le modèle ARDL soit estimé au préalable. Pour cela, nos observations seront orientées vers la valeur de F-Statistique (F-Bounds) et son emplacement par rapport aux bornes inférieure et supérieure.

Tableau 5: Résultats du test de cointégration au bornes « Bounds test » :

F-Bounds Test : Null Hypothesis: No levels relationship				K	4
Test Statistic	Value	Signif	I(0)	I(1)	
F-statistic	10.7712	5%	3.62	4.16	

Source : réalisé par nos soins avec le logiciel Eviews 12

Le résultat du test montre que la valeur F-statistic, qui est égale à 15.16, est largement supérieure à la borne supérieure : 4.16 au seuil de 5%. Cela affirme l'existence de cointégration entre les variables objet de notre étude, par conséquent la possibilité d'estimer les effets de long terme de DIA sur GBTSA.

3.5.6-Causalité entre variables

Le test de causalité au sens de granger n'est pas efficace dans le cas où les séries ne sont pas cointégrées ou intégrées à des ordres différents. De ce fait, le test de granger au sens Toda-Yamamoto est le plus pertinent, l'hypothèse nulle du teste stipule l'absence de causalité entre variables.

Tableau 6: Résultat du test de causalité de Toda-Yamamoto

Variable dépendante	Variables causales	
	GBTSA	DIA
GBTSA	—	0.0447
DIA	0.5444	—

Source : établi par nos soins suite à nos estimations sur le logiciel Eviews 12

Le test de causalité de Toda-Yamamoto révèle une causalité unidirectionnelle allant des investissements en intelligence artificielle (DIA) vers l'émission des obligations vertes (GBTSA), avec une valeur p significative de 0.0447. Cela signifie que l'IA influence significativement le développement du financement durable. En revanche, aucune causalité inverse n'a été détectée (valeur p = 0.5444), ce qui indique que les obligations vertes n'ont pas d'effet significatif sur les investissements en IA.

3.5.6-Coefficients de court terme :

Tableau 7: Résultat d'estimation des coefficients de CT - MCE

ARDL Error Correction Regression (ECM)				
Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
D(GBTSA(-1))	0.258986	0.118292	2.189382	0.0368
D(DIA)	-0.014170	0.006631	-2.137020	0.0412
D(DIA(-1))	0.082731	0.018469	4.479440	0.0001
D(DIA(-2))	0.058679	0.014248	4.118465	0.0003
D(DIA(-3))	0.017960	0.008852	2.028853	0.0517
CointEq(-1)*	-0.043991	0.007485	-5.877272	0.0000

Source : réalisé par nos soins avec le logiciel Eviews 12

Les résultats du modèle ARDL montrent que les effets des investissements en capital-risque dans l'intelligence artificielle et la durabilité environnementale (DIA) sur le volume d'émission des obligations vertes à l'échelle mondiale (GBTSA) se manifestent de manière différée dans le temps. À court terme, une variation immédiate des DIA exerce un effet négatif et significatif sur GBTSA, ce qui peut traduire une réallocation temporaire des ressources financières vers l'IA au détriment du financement vert. Cependant, cet effet

s'inverse progressivement : les retards d'un, deux et trois trimestres affichent des coefficients positifs et significatifs, indiquant un effet de rattrapage. Cette dynamique suggère que, passé une phase initiale de prudence ou d'investissement direct en IA, les bénéfices attendus de cette technologie contribuent à renforcer la transparence et la crédibilité des projets durables, stimulant ainsi les émissions d'obligations vertes. Par ailleurs, la persistance significative de la variable GBTSA elle-même confirme une inertie à court terme dans le comportement du marché des obligations vertes.

Le coefficient d'ajustement ou force de rappel qui représente **la vitesse d'ajustement vers l'équilibre de long terme**, est statistiquement significatif ($\text{Prob} < 0.05$), il est négatif et est compris entre -1 et 0. Sa valeur négative et significative (-0.043991) indique que lorsqu'un écart se crée entre la valeur d'émission des obligations vertes (GBTSA) et son niveau d'équilibre, **environ 4,4 %** de cet écart sera corrigé chaque période (trimestre). La vitesse de retour à l'équilibre est donc plus de 22 trimestres (plus de 5 ans).

3.5.7-Coefficients de long terme :

Tableau 8: Résultat d'estimation des coefficients de LT

Levels Equation				
Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
DIA	-2.905391	0.621967	-4.671297	0.0001
C	13.60755	0.323313	42.08784	0.0000
EC = GBTSA - (-2.9054*DIA + 13.6075)				

Source : réalisé par nos soins avec le logiciel Eviews 12

À long terme, les résultats de l'estimation du modèle ARDL indiquent une relation négative et significative entre les investissements en capital-risque dans l'intelligence artificielle et la durabilité environnementale (DIA) et le volume d'émission des obligations vertes à l'échelle mondiale (GBTSA). Plus précisément, une augmentation d'une unité (milliard USD) des DIA conduit à une diminution de 2,91 milliards USD des émissions d'obligations vertes, ce qui pourrait refléter un effet de substitution durable entre ces deux types d'investissement. La constante du modèle, très significative, suggère un niveau d'équilibre stable de l'émission d'obligations vertes en l'absence d'investissement en IA. Par ailleurs, le mécanisme de correction des écarts montre que le retour à l'équilibre est lent, avec un ajustement de seulement 4,4 % par trimestre, soit environ 22 trimestres pour absorber complètement un choc. Cette lenteur est typique des marchés émergents ou peu liquides, comme celui de la finance verte, où les structures de financement et les mécanismes de confiance se développent progressivement.

IV- Conclusion:

Notre étude a permis d'analyser la dynamique entre les investissements mondiaux en capital-risque dans l'intelligence artificielle et la durabilité environnementale (DIA) et le

volume d'émission des obligations vertes à l'échelle mondiale (GBTSA), en s'appuyant sur un modèle ARDL appliqué à des données trimestrielles couvrant la période 2012–2021. Les résultats obtenus de cette étude, qui ont mis en évidence des dynamiques différenciées à court et long terme, confirment et nuancent certaines conclusions de la littérature existante.

À court terme, nous observons un effet initialement négatif de l'investissement en IA et la durabilité environnementale sur les émissions d'obligations vertes, ce qui semble corroborer les travaux de **Zhang et al. (2020)**¹ sur les effets de substitution temporaire entre investissements technologiques et financement durable. Toutefois, cet effet devient positivement significatif après un à deux trimestres. Cela s'aligne avec les conclusions de **Chen et al. (2021)**², qui soulignent le rôle structurant de l'IA dans le renforcement de la transparence, de la traçabilité et de la confiance dans les projets verts.

À long terme, en revanche, nos résultats mettent en évidence une relation structurellement négative entre DIA et GBTSA. Cette observation rejoint les analyses de **Bousquet et Lemoine (2019)**³, selon lesquelles les technologies émergentes comme l'IA peuvent capter une part significative et croissante des ressources d'investissement et cannibalisent, par conséquent, les mécanismes de financement plus conventionnels comme les obligations vertes. Ce constat est renforcé par un ajustement vers l'équilibre lent et progressif. Cette lenteur suggère également que, dans les marchés encore en maturation, tels que celui de la finance verte, les mécanismes de coordination entre innovation technologique et financement durable demeurent imparfaits et restent en construction.

En définitive, cette étude met en lumière la nécessité d'un encadrement stratégique et coordonné des investissements dans les technologies de rupture comme l'intelligence artificielle, afin de favoriser une dynamique de complémentarité avec les instruments de financement de la transition écologique, plutôt qu'un phénomène de concurrence ou de substitution. Ces conclusions appellent donc à la nécessité de politiques hybrides combinant instruments de marché (comme les obligations vertes) et soutien direct à la recherche et développement et politiques d'innovation, comme le suggèrent également les travaux de **Hall, Martin & Verdolini (2020)**⁴.

¹ Zhang, B., Yang, Y., & Bi, J. (2020). *Tracking the substitution effect of green technology innovation on traditional environmental investment*. Evidence from Chinese listed firms.

² Chen, Y., Marinova, D., & Guo, X. (2021). Can AI help achieve the Sustainable Development Goals? *Technological Forecasting and Social Change*, 168, 120732.

³ Bousquet, F., & Lemoine, M. (2019). Technologies émergentes et politiques d'innovation : quelles tensions pour la durabilité ? *Revue d'Économie Industrielle*, 165(1), 109–135.

⁴ Hall, B. H., Martin, R., & Verdolini, E. (2020). Innovation for climate change mitigation: A review of the literature. *Energy Economics*, 90, 104878.

V-REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES:

- Berg, F., Kölbel, J., & Rigobon, R. (2020). Aggregate Confusion: The Divergence of ESG Ratings. MIT Sloan School Working Paper.
- Bousquet, F., & Lemoine, M. (2019). *Technologies émergentes et politiques d'innovation : quelles tensions pour la durabilité ?* Revue d'Économie Industrielle, 165(1), 109–135.
- Chen, Y., Marinova, D., & Guo, X. (2021). *Can AI help achieve the Sustainable Development Goals?* Technological Forecasting and Social Change, 168, 120732.
- Christidis, K., & Devetsikiotis, M. (2016). Blockchains and Smart Contracts for the Internet of Things. IEEE Access, 4, 2292-2303.
- Clapp, C., Briner, G., & Karousakis, K. (2012). Incentives for Climate Mitigation in the Land Use Sector: A Comparison of Carbon Pricing and Subsidy Approaches. OECD.
- Climate Bonds Initiative (CBI). (2023). Green Bond Database Methodology.
- European Commission (2021). *EU Green Bond Standard & Taxonomy Regulation*.
- European Commission. (2020). EU Taxonomy Regulation 2020/852.
- Flammer, C. (2021). *Corporate green bonds*. Journal of Financial Economics, 142(2), 499–516.
- Hall, B. H., Martin, R., & Verdolini, E. (2020). *Innovation for climate change mitigation: A review of the literature*. Energy Economics, 90, 104878.
- Hou, C., & Gao, H. (2023). *AI-enhanced ESG screening and green bond issuance: Evidence from China*. Journal of Sustainable Finance & Investment.
- Huang, Y., Qiu, Y., & Wang, Y. (2021). Blockchain and Green Finance: The Potential of Smart Green Bonds. Finance Research Letters, 38, 101680.
- Huang, Z., Wang, J., & Chen, L. (2021). Blockchain-enabled smart contracts for green bond management: Transparency and automation.
- ICMA (2021). *Green Bond Principles: Voluntary Process Guidelines for Issuing Green Bonds*.
- ICMA. (2023). Green Bond Principles (GBP).
- Kotsiantis, S., Kanellopoulos, D., & Pintelas, P. (2007). Machine learning: a review of classification and combining techniques. Artificial Intelligence Review, 26(3), 159-
- OECD (2022). *Artificial Intelligence in Finance: Promises and Challenges*.
- SEC. (2023). Enhancement and Standardization of Climate-Related Disclosures for Investors.
- Wang, Y., & Li, S. (2021). *Artificial Intelligence, Transparency, and the Green Bond Market*. Finance Research Letters, 41, 101841.
- World Economic Forum (2022). *How AI is powering sustainable finance*.
- Zhang, B., Yang, Y., & Bi, J. (2020). *Tracking the substitution effect of green technology innovation on traditional environmental investment: Evidence from Chinese listed firms*. Technological Forecasting and Social Change, 158, 120128.
- Zhang, J., Zhang, Y., & Luo, L. (2022). AI-Driven Evaluation Models for ESG Risk Assessment. Journal of Sustainable Finance & Investment, 12(3), 389–412.