Revue-IRS

Revue Internationale de la Recherche Scientifique
(Revue-IRS)
ISSN: 2958-8413
Vol. 4, No. 6, Novembre, 2026

This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

Intelligence artificielle et performance académique dans les classes préparatoires aux grandes écoles marocaines : proposition d'un cadre de modélisation théorique

Driss SALEM

Faculté d' Économie et Gestion, Université Hassan Premier, Settat, Maroc. d.salem@uhp.ac.ma

Abdellah DERKAOUI

Faculté d'Économie et de Gestion, Université Ibn Tofail, Kénitra, Maroc

Résumé

Ce papier propose une modélisation économétrique de l'impact de l'intelligence artificielle (IA) sur la performance académique dans les classes préparatoires aux grandes écoles (CPGE) au Maroc.

Les classes préparatoires aux grandes écoles (CPGE), en raison de leur rôle stratégique dans la formation des élites scientifiques, technologiques et économiques, constituent un terrain d'étude privilégié pour analyser cette transformation.

L'objectif est d'analyser comment l'intégration de l'IA influence la performance académique des élèves et transforme les pratiques pédagogiques.

Le modèle principal repose sur un panel à effets fixes, permettant de neutraliser les caractéristiques inobservées propres aux centres et filières. Des extensions méthodologiques sont mobilisées pour renforcer l'identification causale : différences-en-différences (DiD) pour exploiter l'adoption progressive de l'IA, variables instrumentales (IV/2SLS) pour corriger l'endogénéité, et régressions quantiles pour explorer l'hétérogénéité des effets selon les profils d'élèves. Enfin, des modèles de médiation permettent d'identifier les mécanismes par lesquels l'IA agit (personnalisation, feedback, charge de correction des enseignants).

Les résultats attendus suggèrent que l'IA améliore la performance académique et favorise la personnalisation des apprentissages, tout en redéfinissant le rôle des enseignants et les modalités d'évaluation. Toutefois, l'impact sur l'équité demeure contrasté : l'IA peut réduire les écarts de performance si son accès est généralisé, mais risque de les accentuer en cas de disparités d'infrastructures ou de formation.

Cette recherche contribue à la littérature sur l'innovation pédagogique en proposant un cadre empirique adapté au contexte marocain. Elle offre également des recommandations pour une intégration responsable et inclusive de l'IA dans les CPGE, en insistant sur la formation des enseignants, l'équité d'accès aux outils numériques et la régulation éthique des usages.

Mots-clés: Intelligence artificielle; Performance académique; CPGE; Modèle à effets fixes.

Digital Object Identifier (DOI): https://doi.org/10.5281/zenodo.**24623422**

I. Introduction

Au cours des dernières décennies, l'essor des technologies numériques a profondément transformé les systèmes éducatifs à travers le monde. Parmi les innovations les plus marquantes, l'intelligence artificielle (IA) occupe aujourd'hui une place centrale dans les réflexions portant sur l'avenir de l'enseignement et de l'apprentissage. Les progrès récents réalisés dans les domaines de l'apprentissage automatique, de l'analyse prédictive et de l'intelligence artificielle générative ont permis l'émergence de nouveaux outils capables d'assister les enseignants, de personnaliser les parcours d'apprentissage et d'accompagner les étudiants dans leurs activités académiques. Alors que l'éducation a longtemps reposé sur des approches pédagogiques relativement standardisées, l'IA ouvre la perspective d'une adaptation plus fine des contenus, des méthodes et des rythmes d'apprentissage aux caractéristiques individuelles des apprenants.

Cette transformation suscite un intérêt croissant de la part des chercheurs, des institutions éducatives et des décideurs publics. Les promesses associées à l'intelligence artificielle sont nombreuses. Les outils de tutorat intelligent sont susceptibles d'améliorer le suivi individuel des étudiants, les systèmes de recommandation pédagogiques peuvent orienter les apprenants vers des ressources adaptées à leurs besoins, tandis que les technologies d'automatisation permettent d'alléger certaines tâches répétitives réalisées par les enseignants. En parallèle, l'IA facilite l'exploitation de grandes quantités de données éducatives, ouvrant la voie à une meilleure compréhension des trajectoires d'apprentissage et à l'identification précoce des difficultés scolaires.

Cependant, cette évolution technologique soulève également d'importantes interrogations. Si l'intelligence artificielle peut constituer un puissant levier d'amélioration de la performance académique, ses effets réels demeurent encore insuffisamment documentés dans de nombreux contextes éducatifs. Les bénéfices annoncés ne sont pas nécessairement uniformes selon les établissements, les disciplines ou les profils d'étudiants. En outre, plusieurs questions demeurent ouvertes concernant les transformations du rôle des enseignants, les modalités d'évaluation des apprentissages, la protection des données éducatives ou encore les risques liés à l'accentuation des inégalités numériques. L'intégration de l'IA dans l'éducation ne constitue donc pas uniquement un enjeu technologique, mais également un enjeu pédagogique, social et institutionnel. Dans ce contexte, les Classes Préparatoires aux Grandes Écoles (CPGE) marocaines apparaissent comme un terrain d'analyse particulièrement pertinent. Occupant une place stratégique dans le système éducatif national, les CPGE ont pour mission de préparer les meilleurs bacheliers aux concours d'accès aux grandes écoles d'ingénieurs, de management et autres établissements d'excellence. Elles se distinguent par un haut niveau d'exigence académique, une forte intensité de travail, un encadrement pédagogique soutenu ainsi qu'une culture de performance étroitement liée aux résultats obtenus aux concours nationaux et internationaux. Cette spécificité en fait un environnement particulièrement adapté à l'étude de l'impact potentiel de l'intelligence artificielle sur les performances académiques. Plusieurs caractéristiques renforcent l'intérêt scientifique de ce choix. D'une part, les CPGE disposent d'un cadre institutionnel relativement homogène, caractérisé par des programmes nationaux harmonisés, des procédures d'évaluation standardisées et des concours communs permettant de comparer objectivement les résultats entre établissements et filières. D'autre part, la forte pression académique exercée sur les étudiants et les enseignants crée un contexte dans lequel les outils d'intelligence artificielle sont susceptibles de produire des effets significatifs, notamment en matière de personnalisation des apprentissages, d'accompagnement pédagogique ou de gestion de la charge de travail. Enfin, l'importance stratégique des CPGE dans la formation des futures élites scientifiques, technologiques et économiques du pays confère une dimension particulière à l'analyse de ces innovations éducatives.

Malgré l'intérêt croissant porté à l'intelligence artificielle dans le domaine de l'éducation, peu de travaux se sont spécifiquement intéressés au cas des CPGE marocaines. La littérature existante est principalement concentrée sur l'enseignement supérieur, l'enseignement scolaire général ou les

environnements numériques d'apprentissage dans des contextes internationaux. Les spécificités organisationnelles, pédagogiques et institutionnelles des classes préparatoires justifient pourtant le développement d'un cadre d'analyse adapté à ce contexte particulier. Il apparaît dès lors nécessaire de proposer une approche théorique permettant d'identifier les mécanismes susceptibles de relier l'adoption de l'intelligence artificielle aux performances académiques des étudiants, tout en prenant en considération les enjeux d'équité éducative et les transformations des pratiques pédagogiques.

La problématique centrale de cette recherche peut ainsi être formulée de la manière suivante : **dans quelle mesure l'intégration de l'intelligence artificielle dans les CPGE marocaines est-elle susceptible d'influencer les performances académiques des étudiants, de transformer les pratiques pédagogiques et d'affecter l'équité éducative?**

Cette interrogation générale se décline en plusieurs questions spécifiques : l'utilisation de l'intelligence artificielle contribue-t-elle à améliorer les résultats académiques des étudiants? Quels sont les mécanismes par lesquels cette technologie produit ses effets éventuels? L'impact observé varie-t-il selon les filières, les établissements ou les caractéristiques socioéconomiques des apprenants? Enfin, l'intelligence artificielle constitue-t-elle un facteur de réduction des inégalités éducatives ou risque-t-elle, au contraire, de renforcer certaines disparités déjà existantes ?

Afin de répondre à ces interrogations, cette recherche repose sur l'hypothèse générale selon laquelle l'intégration de l'intelligence artificielle améliore globalement les performances académiques des étudiants en CPGE en renforçant la personnalisation des apprentissages, l'accès aux ressources éducatives et l'efficacité des pratiques d'enseignement. Toutefois, les bénéfices attendus ne seraient pas nécessairement homogènes pour l'ensemble des étudiants et pourraient dépendre des conditions d'accès aux outils numériques, du niveau initial des apprenants ou encore des ressources disponibles dans les établissements.

L'objectif principal de cet article est de proposer un cadre de modélisation théorique permettant d'analyser les effets potentiels de l'intelligence artificielle dans les CPGE marocaines. Plus précisément, il s'agit de construire une stratégie économétrique susceptible d'identifier les effets de l'IA sur les performances académiques, d'explorer les mécanismes de transmission de ces effets et d'évaluer leurs implications en matière d'équité éducative. Dans cette perspective, l'étude mobilise plusieurs approches complémentaires, notamment des modèles de panel à effets fixes, des méthodes en différences-en-différences, des variables instrumentales, des régressions quantiles et des modèles de médiation.

Sur le plan épistémologique, cette recherche s'inscrit dans une démarche pragmatique associant les apports du positivisme et du constructivisme. Le positivisme justifie le recours à des indicateurs observables et à des outils économétriques destinés à mesurer les effets de l'intelligence artificielle sur les performances académiques. Le constructivisme rappelle quant à lui que les usages de l'IA résultent également de processus sociaux, organisationnels et pédagogiques qui influencent la manière dont ces technologies sont appropriées par les acteurs éducatifs. Cette articulation permet de construire un cadre d'analyse conciliant rigueur quantitative et prise en compte de la complexité du contexte éducatif.

La contribution de cet article est double. D'une part, il enrichit la littérature émergente consacrée à l'intelligence artificielle en éducation en proposant un cadre conceptuel spécifiquement adapté aux CPGE marocaines. D'autre part, il fournit une base méthodologique susceptible de guider de futures évaluations empiriques de l'impact de l'intelligence artificielle dans le système éducatif marocain. Au-delà de son intérêt scientifique, cette réflexion vise également à éclairer les décideurs publics, les responsables pédagogiques et les enseignants engagés dans les processus de transformation numérique de l'éducation.

L'originalité de cette recherche réside dans trois contributions principales. Premièrement, elle constitue, à notre connaissance, l'une des premières tentatives de modélisation de l'impact de l'intelligence artificielle dans le contexte spécifique des CPGE marocaines. Deuxièmement, elle

propose un cadre méthodologique intégré combinant modèles de panel à effets fixes, différences-en-différences, variables instrumentales, régressions quantiles et modèles de médiation. Troisièmement, elle introduit un indice multidimensionnel d'adoption de l'intelligence artificielle prenant en compte les usages pédagogiques, les infrastructures numériques et les dispositifs institutionnels.

La suite de l'article est organisée comme suit :la deuxième section présente le cadre théorique et la revue de littérature sur l'intelligence artificielle en éducation. La troisième caractérise les CPGE marocaines et justifie leur choix comme terrain d'analyse. La quatrième expose la stratégie économétrique, de la construction de l'indice d'adoption aux tests de robustesse. La cinquième présente les résultats théoriquement attendus, dont la sixième discute les apports et les limites. La septième formule des recommandations pour une intégration responsable de l'IA dans les CPGE. La huitième conclut et propose des perspectives de recherche.

II. Cadre théorique et revue de littérature

2.1. IA et éducation : concepts, formes et tendances internationales

2.1.1. Définitions et conceptualisation

L'**intelligence artificielle (IA)** désigne l'ensemble des techniques et systèmes informatiques capables de simuler des fonctions cognitives humaines telles que l'apprentissage, le raisonnement, la perception ou la prise de décision. Plusieurs auteurs ont proposé des définitions qui éclairent la diversité des approches :

- Selon Turing (1950), l'IA est envisagée comme la capacité d'une machine à réaliser des tâches de manière indiscernable de l'humain, ce qui est formalisé dans son célèbre *test de Turing*. *Référence : Turing, A. M. (1950). Computing Machinery and Intelligence. Mind, 59(236), 433–460.*
- Pour Margaret A. Boden (2018) « L'intelligence artificielle cherche à faire en sorte que les ordinateurs accomplissent des tâches que les esprits humains savent réaliser, telles que la perception, l'association, la prédiction, la planification et le contrôle moteur. » *Référence: Boden, M. A. (2018). Artificial Intelligence: A Very Short Introduction*. Oxford University Press.
- Olivier Pallanca & J. Read (2021) définissent l'IA comme « la discipline qui vise à reproduire, par des machines, les méthodes ou les résultats du raisonnement et de l'intuition humaine ». *Référence : Pallanca, O., & Read, J. (2021). Principes généraux et définitions en intelligence artificielle. Archives des Maladies du Cœur et des Vaisseaux – Pratique*, 294, 3–10.
- D'après Benoît Georges (2019) « L'intelligence artificielle recouvre un ensemble de techniques permettant à des systèmes informatiques de simuler certaines capacités cognitives humaines, avec des applications allant de la reconnaissance d'images à la prise de décision. » *Référence : Georges, B. (2019). Intelligence artificielle : de quoi parle-t-on ? Constructif*, 54, 5–10.
- Haroon Sheikh, Corien Prins & Erik Schrijvers (2023) rappellent qu'« il n'existe pas de définition universellement acceptée de l'IA », mais qu'elle peut être comprise comme « un champ visant à développer des systèmes capables d'exécuter des tâches nécessitant normalement l'intelligence humaine ». *Référence: Sheikh, H., Prins, C., & Schrijvers, E. (2023). Artificial Intelligence: Definition and Background*. Springer.
- Enfin , Homero Gil de Zúñiga, Manuel Goyanes & Timilehin Durotoye (2023) Proposent une définition conceptuelle de l'IA comme « un cadre théorique et technologique permettant de concevoir des systèmes capables de percevoir, raisonner et agir dans des environnements complexes ». *Référence : Gil de Zúñiga, H., Goyanes, M., & Durotoye, T. (2023). A Scholarly Definition of Artificial Intelligence (AI). Political Communication*.

Ces définitions montrent que l'IA est à la fois un **concept théorique** et une **technologie appliquée**, oscillant entre une approche symbolique (basée sur des règles) et une approche statistique (apprentissage automatique).

Tableau n° 1 : Résumé des définitions de l'intelligence artificielle

Année	Auteur	Définition	Référence
1950	Alan Turing	L'IA est la capacité d'une machine à réaliser des tâches de manière indiscernable de l'humain (test de Turing).	Turing, A. M. (1950). *Computing Machinery and Intelligence* . Mind, 59(236), 433–460.
2018	Margaret A. Boden	L'IA cherche à faire en sorte que les ordinateurs accomplissent des tâches que les esprits humains savent réaliser (perception, prédiction, planification).	Boden, M. A. (2018). *Artificial Intelligence: A Very Short Introduction* . Oxford University Press.
2021	Olivier Pallanca & J. Read	Discipline visant à reproduire, par des machines, les méthodes ou les résultats du raisonnement et de l'intuition humaine.	Pallanca, O., & Read, J. (2021). *Principes généraux et définitions en intelligence artificielle* . Archives des Maladies du Cœur et des Vaisseaux – Pratique, 294, 3–10.
2019	Benoît Georges	Ensemble de techniques permettant à des systèmes informatiques de simuler certaines capacités cognitives humaines.	Georges, B. (2019). *Intelligence artificielle : de quoi parle-t-on ?* Constructif, 54, 5–10.
2023	Haroon Sheikh, Corien Prins & Erik Schrijvers	Champ visant à développer des systèmes capables d'exécuter des tâches nécessitant normalement l'intelligence humaine.	Sheikh, H., Prins, C., & Schrijvers, E. (2023). *Artificial Intelligence: Definition and Background* . Springer.
2023	Homero Gil de Zúñiga, Manuel Goyanes & Timilehin Durotoye	Cadre théorique et technologique permettant de concevoir des systèmes capables de percevoir, raisonner et agir dans des environnements complexes.	Gil de Zúñiga, H., Goyanes, M., & Durotoye, T. (2023). *A Scholarly Definition of Artificial Intelligence (AI)* . Political Communication.

Source : Auteurs

2.1.2. Formes et applications de l'IA en éducation

- **IA symbolique** : systèmes experts utilisés historiquement pour résoudre des problèmes structurés.
- **IA statistique et apprentissage automatique** : algorithmes capables d'apprendre à partir de données, appliqués à la prédiction et à la classification.
- **IA générative** : modèles avancés (réseaux de neurones profonds, modèles de langage) produisant du texte, des images ou des solutions pédagogiques personnalisées.

Dans le domaine éducatif, ces formes se traduisent par :

- **Tutorat intelligent** : suivi individualisé des apprenants.
- **Plateformes adaptatives** : ajustement des contenus selon les besoins.
- **Analyse prédictive** : anticipation des difficultés et proposition de solutions ciblées.

2.1.3. Tendances internationales

Les rapports de l'UNESCO et de l'OCDE soulignent que l'IA peut être un vecteur de réduction des disparités éducatives, mais qu'elle comporte aussi le risque d'accentuer les inégalités si son déploiement n'est pas accompagné de politiques inclusives. Les pays pionniers (États-Unis, Chine, Corée du Sud) investissent massivement dans l'IA éducative, tandis que d'autres contextes, notamment africains, doivent composer avec des infrastructures limitées.

2.2. Revue de littérature sélective

L'intelligence artificielle (IA) appliquée à l'éducation a suscité, au cours des dernières années, une abondante production scientifique. Les travaux existants se distinguent par la variété de leurs approches, allant de l'analyse des outils d'apprentissage personnalisés à l'évaluation des impacts pédagogiques et éthiques. Cette diversité reflète la complexité des enjeux liés à l'intégration de l'IA dans les systèmes éducatifs, et souligne la nécessité d'une lecture critique et comparative.

Le tableau ci-dessous rassemble une sélection de contributions représentatives, organisées selon leurs thématiques principales. Il met en évidence les apports et limites de chaque approche, afin de fournir une vue d'ensemble claire et structurée des connaissances disponibles.

Tableau n° 2 : Liste sélective des travaux antérieurs

Année	Auteurs	titre	Méthodologie	Types d'IA étudiés	Résultats principaux
2024	Ouoba	L'intégration des outils d'intelligence artificielle dans l'enseignement supérieur : perceptions, usages et défis[1]	Étude qualitative (entretiens enseignants/étudiants)	Chatbots, outils de correction, IA générative	Usages fréquents : aide à la rédaction, correction, tutorat. Besoin de formation et d'infrastructures.
2024	Vallerand & Hamel	Le développement professionnel des enseignants à et avec l'intelligence artificielle : une revue de	Revue de littérature	Outils d'IA pour formation et accompagnement	L'IA peut soutenir la formation continue et l'innovation pédagogique. Accent sur la collaboration et l'appropriation par les enseignants.
2024	Messaoudi	Les défis de l'IA dans l'éducation : de la protection des données aux biais algorithmiques[3]	Analyse critique	IA générative, systèmes prédictifs	Problèmes de données, biais et gouvernance. Importance de la personnalisation et de l'encadrement institutionnel.
2024	Zitouni Y., Jenfi A.	L'intelligence artificielle au service de l'éducation au Maroc: opportunités, défis et perspectives	Etude déscriptive	Outils d'IA pour formation et accompagnement	Personnalisation, modernisation et amélioration potentielle de la qualité; obstacles: autonomie institutionnelle, inégalités, compétences numériques; propose intégration progressive avec
2024	Razouki, H., Cherradi, B., Hair, A. et Razouki, A.	L'impact de l'intelligence artificielle sur l'enseignement et l'apprentissage : Enjeux et perspectives[5]	Etude déscriptive	Tuteurs intelligents, systèmes adaptatifs, IA prédictive	L'IA modifie le rôle des enseignants. Améliore le suivi et la personnalisation.
2024	V, Pascal et al	IA générative et stratégies pédagogiques[6]	Etude déscriptive	IA générative, systèmes adaptatifs,	L'accent est mis sur l'usage responsable, la personnalisation des apprentissages et l'adaptation des méthodes existantes
2023	Collin, Lepage & Nebel	Enjeux éthiques et critiques de l'intelligence artificielle en éducation : une revue systématique de la	Revue systématique	IA générative, systèmes adaptatifs, learning analytics	Risques liés aux biais, gouvernance et transparence. Importance d'une approche critique et participative.
2023	Moussavou	ChatGPT dans la rédaction scientifique : des perspectives prometteuses, des préoccupations légitimes[8]	Etude analytique	IA générative	L'étude montre que ces outils bouleversent les méthodes traditionnelles, favorisent l'innovation pédagogique et suscitent de nouveaux débats sur l'évaluation et l'intégrité académique
2023	Brahmi, Halima et coll.	Vers un référentiel universel pour un usage éthique de l'intelligence artificielle[9]	Revue multidisciplinaire	Learning analytics, IA générative, systèmes de recommandation	Gains en accessibilité et efficacité. Importance de la formation des acteurs et du cadre éthique.
2021	Holmes et al.	Inteligencia artificial y educación: Guide para las personas a cargo de formular políticas[10]	Revue critique	IA prédictive, learning analytics	L'IA comme outil de pilotage éducatif. Menace pour l'autonomie pédagogique.

Source : Auteurs

[1]Ouoba, N. E. (2024). L'intégration des outils d'intelligence artificielle dans l'enseignement supérieur: perceptions, usages et défis. *Les Cahiers de l'ACAREF*, *4*.

[2] Vallerand, V., & Hamel, C. (2024). Le développement professionnel des enseignants à et avec l'intelligence artificielle: une revue de littérature. *Médiations & médiatisations*, (18), 9-42.

[3] Messaoudi, A. (2024). Les défis de l'IA dans l'éducation: de la protection des données aux biais algorithmiques. *Médiations & médiatisations*, (18), 148-160.

[4] Jenfi, Y., & Zitouni, A. (2024). L'intelligence artificielle au service de l'éducation au Maroc: opportunités, défis et perspectives. *Revue internationale de gestion et d'économie appliquée*, *2*(09), 1-15.

[5] Razouki, H., Cherradi, B., Hair, A., & Razouki, A. (2025). L'impact de l'intelligence artificielle sur l'enseignement et l'apprentissage: Enjeux et perspectives. In *SHS Web of Conferences* (Vol. 214, p. 01010). EDP Sciences.

[6] http://hdl.handle.net/20.500.12279/1089.3

[7] Collin, S., Lepage, A., & Nebel, L. (2023). Enjeux éthiques et critiques de l'intelligence artificielle en éducation: une revue systématique de la littérature. *Canadian Journal of Learning and Technology*, *49*(4), 1-29.

[8] Moussavou, J. (2023). ChatGPT dans la rédaction scientifique: des perspectives prometteuses, des préoccupations légitimes. *Management & Datascience*.

[9] Brahmi, H., Belouali, S., Demazeau, Y., Bouchentouf, T., & Alaoui, N. H. (2023). Vers un référentiel universel pour un usage éthique de l'intelligence artificielle. *East African Journal of Information Technology*, *6*(1), 91-106.

Cette revue sélective consacrée à l'intelligence artificielle en éducation met en évidence une évolution progressive des préoccupations des chercheurs. Les premiers travaux se sont concentrés sur les systèmes de tutorat intelligent et la personnalisation des apprentissages, en soulignant le potentiel de l'IA pour offrir un suivi individualisé et améliorer la progression des étudiants. Cette approche technocentrée a ensuite été enrichie par des études plus globales, qui interrogent l'impact de l'IA sur les pratiques pédagogiques, le rôle des enseignants et les modalités d'évaluation.

Parallèlement, des recherches empiriques et institutionnelles ont insisté sur les enjeux éthiques et sociaux liés à l'usage de l'IA. Les questions de transparence des algorithmes, de biais prédictifs et d'équité d'accès aux ressources numériques sont devenues centrales, notamment dans les contextes où les infrastructures éducatives sont inégalement réparties. Les rapports internationaux, tels que ceux de l'UNESCO, rappellent que l'IA peut être un vecteur de réduction des disparités, mais qu'elle comporte aussi le risque d'accentuer les inégalités si son déploiement n'est pas accompagné de politiques inclusives.

Enfin, les travaux les plus récents mettent en avant la dimension innovante de l'IA dans la didactique, en soulignant son rôle dans la stimulation de la créativité pédagogique et la collaboration entre apprenants. Cette évolution traduit un glissement de l'IA perçue comme simple outil technique vers une technologie éducative intégrée, qui reconfigure les dynamiques d'enseignement et d'apprentissage. Dans le cas des CPGE marocaines, cette littérature fournit un cadre de référence précieux, mais appelle à une contextualisation spécifique : intensité académique, rôle stratégique dans la formation des élites et disparités régionales imposent une lecture critique des apports internationaux.

2.3. Hypothèses de recherche

À la lumière du cadre théorique présenté et des enseignements dégagés de la littérature relative à l'intelligence artificielle en éducation, plusieurs hypothèses de recherche peuvent être formulées. Ces hypothèses constituent les propositions théoriques qui guideront la construction du modèle économétrique et l'interprétation des résultats.

H1 : Effet direct de l'IA sur la performance académique

L'adoption de l'intelligence artificielle améliore significativement les performances académiques des étudiants des CPGE marocaines.

Cette hypothèse repose sur les travaux montrant que les outils d'IA favorisent un accompagnement pédagogique plus individualisé, un accès facilité aux ressources éducatives et une amélioration du suivi des apprentissages.

H2 : Rôle médiateur de la personnalisation des apprentissages

L'effet de l'intelligence artificielle sur les performances académiques est positivement médié par la personnalisation des apprentissages.

L'IA permet d'adapter les contenus, les exercices et les recommandations pédagogiques aux besoins spécifiques de chaque étudiant, ce qui constitue l'un des principaux mécanismes susceptibles d'expliquer les gains de performance observés.

H3 : Hétérogénéité des effets selon les filières

L'impact de l'intelligence artificielle diffère selon les filières des CPGE.

Les spécificités pédagogiques des filières scientifiques, technologiques et économiques peuvent conduire à des niveaux d'efficacité différents des outils d'IA, notamment en raison de la diversité des méthodes d'enseignement et des types d'exercices mobilisés.

H4 : Hétérogénéité selon le niveau académique initial

Les bénéfices associés à l'intelligence artificielle varient selon la position des étudiants dans la distribution des performances académiques.

L'IA peut soit favoriser le rattrapage des étudiants en difficulté grâce à des dispositifs d'accompagnement personnalisés, soit bénéficier davantage aux étudiants les plus performants capables d'exploiter pleinement les outils disponibles.

H5 : Effets conditionnels sur l'équité éducative

L'impact de l'intelligence artificielle sur l'équité éducative dépend du niveau d'accès aux ressources numériques et des conditions d'utilisation des technologies.

Lorsque l'accès aux outils numériques est largement partagé, l'IA peut contribuer à réduire certaines inégalités éducatives. À l'inverse, des disparités d'équipement, de connectivité ou de compétences numériques peuvent conduire à un renforcement des écarts existants.

Ces hypothèses structurent l'ensemble de la démarche empirique proposée et orientent les différentes stratégies d'identification présentées dans la section méthodologique.

Tableau n° 3 : Synthèse reliant hypothèses et modèles économétriques

Hypothèse	Méthode de test
H1	Panel à effets fixes, IV
H2	Modèles de médiation, SEM
H3	Interactions IA × Filière
H4	Régressions quantiles
H5	Interactions IA × variables socioéconomiques

Source : Auteurs

III. Les CPGE marocaines comme terrain d'analyse

3.1. Organisation des CPGE

Les Classes Préparatoires aux Grandes Écoles (CPGE) au Maroc constituent un cycle sélectif et intensif destiné à former une élite scientifique, technologique et économique. Placées sous la tutelle du Ministère de l'Éducation nationale[10], elles sont intégrées au système éducatif national et rattachées à des lycées publics ou à des établissements privés agréés. Inspirées du modèle français, elles ont progressivement été généralisées à l'ensemble du territoire depuis les années 1990, avec une harmonisation nationale opérée par la Note Cadre de 2011 et des réformes successives jusqu'en 2023–2024.

L'organisation des études repose sur deux années post-baccalauréat, structurées en première et deuxième année, avec un rythme intensif marqué par les **khôlles** (interrogations orales), les devoirs surveillés et les concours blancs.

3.2. Finalités et missions

La finalité des CPGE est de préparer aux concours nationaux communs (écoles d'ingénieurs), aux concours des écoles de commerce et de gestion, ainsi qu'aux concours français des grandes écoles.

L'encadrement pédagogique est assuré par des professeurs agrégés et certifiés, souvent docteurs, sélectionnés pour leur expertise disciplinaire. Leur charge horaire est particulièrement élevée, incluant cours magistraux, colles, encadrement des **TIPE** (Travaux d'Initiative Personnelle Encadrés) et suivi individualisé des étudiants. L'encadrement administratif et réglementaire est défini par des circulaires et arrêtés ministériels, garantissant l'uniformité nationale des programmes et des évaluations, tout en permettant une adaptation aux besoins régionaux. Les concours, tels que le **Concours National Commun (CNC)**, sont organisés selon des règles strictes, avec des commissions de surveillance et de correction, assurant l'équité et la transparence.

3.3. Filières proposées

Les CPGE sont réparties en 2 grands pôles : un pôle scientifique et technologique et un pôle économique et commercial. Les filières suivent la typologie internationale, elles sont organisées comme suit :

- Filières scientifiques et technologiques :

- Mathématiques et Physique ou MP[11]

[10] arrêté ministériel n° 455.02 du 5 juin 2004

[11] arrêté ministériel n°456.02 du 5 juin 2004

- Physique et Chimie ou PC[12]
- Physique et Sciences de l'ingénieur ou PSI[13]
- Technologie et Sciences Industrielles ou TSI[14]

➢ Filières économiques et commerciales :

- Économie et Commerce, option Technologique ou ECT[15].
- Économie et Commerce, option Scientifique ou ECS[16].

Tableau n° 4 : Filières proposées dans les CPGE

CPGE	Sigle	1re année	2e année
Mathématiques Physique et Sciences de l'Ingénieur	MPSI	*	
Physique Chimie et Sciences de l'Ingénieur	PCSI	*	
Technologie et Sciences Industrielles	TSI	*	*
Economie et Commerce - Option scientifique	ECS	*	*
Economie et Commerce - Option technologique	ECT	*	*
Mathématiques et Physique	MP		*
Physique et Chimie	PC		*
Physique et Sciences de l'Ingénieur	PSI		*

Source : Auteurs, données Direction Générale de l'Action Pédagogique, Rapport rentrée scolaire de janvier 2024

3.4. Modes d'accès

Les modes d'accès aux CPGE au Maroc reposent sur la sélection des bacheliers selon leur filière, leur mention et leur âge. L'inscription se fait en ligne chaque année, suivie d'une affectation selon le mérite et les places disponibles.

Généralement, L'intégration des Classes Préparatoires aux Grandes Écoles (CPGE) au Maroc se fait selon trois parcours distincts :

- **Baccalauréat marocain** Les élèves ayant obtenu un baccalauréat marocain accèdent aux CPGE conformément aux dispositions de la lettre ministérielle n°165X24 du 24 mai 2024. Ce texte encadre l'ensemble du processus : dépôt de candidature, sélection, et inscription.
- **Baccalauréat étranger – candidats marocains** Les élèves de nationalité marocaine titulaires d'un baccalauréat étranger voient leur dossier examiné par une commission centrale spécialisée. Un quota d'environ **50 places** est réservé chaque année à cette catégorie, toutes filières confondues.
- **Baccalauréat étranger – candidats étrangers** Les élèves étrangers titulaires d'un baccalauréat non marocain doivent passer par **l'Agence Marocaine de Coopération Internationale (AMCI)**, qui centralise les candidatures et gère le quota dédié. Environ **100 places** sont attribuées annuellement à ces candidats, toutes filières confondues.

Tableau n° 5 : Modes d'accès aux CPGE

Nationalité	Baccalauréat Marocain	Baccalauréat Étranger
Marocaine	Parcours 1	Parcours 2
Étrangère	Parcours 1	Parcours 3

Source : Données de la Direction Générale de l'Action Pédagogique, présentation auteur

[12] arrêté ministériel n°457.02 du 5 juin 2004
[13] arrêté ministériel n°458.02 du 5 juin 2004
[14] arrêté ministériel n°460.02 du 5 juin 2004
[15] arrêté ministériel n°462.17 du 26 septembre 2004
[16] arrêté ministériel n°463.17 du 26 septembre 2004

3.5. Partenariats public-privé

Le premier lycée d'excellence (Lydex) a été créé par l'OCP à Benguérir en 2014-2015, à la suite d'une convention-cadre avec le ministère de l'Éducation nationale. Trois ans plus tard, le lycée Al Zahrawi de Rabat est né d'un partenariat entre le ministère et la Fondation Cheikh Zaïd. Le Lycée Méditerranéen (Lymed), porté par le Groupe Tanger Med, est le plus récent des trois.

Ces établissements constituent une catégorie distincte dans l'offre de CPGE, à côté des centres publics et du secteur privé. Dans les effectifs de 2024-2025, ils représentent 728 étudiants, soit 5,6 % du total (tableau n°). Le Lydex accueille depuis sa création un grand nombre de boursiers issus de milieux défavorisés.

Leurs résultats aux concours français sont régulièrement mis en avant. En 2023, 23 des 25 étudiants issus de CPGE marocaines admis à l'École polytechnique avaient été formés dans des établissements en partenariat public-privé. Ces résultats reflètent toutefois en partie une sélection à l'entrée et des moyens spécifiques. Ils ne permettent pas, à eux seuls, d'attribuer un effet à la formule du partenariat. Cette hétérogénéité de ressources justifie, pour la stratégie empirique, l'inclusion d'effets fixes centre-filière et d'indicateurs d'infrastructures numériques.

3.6. Débouchés

Les débouchés des classes préparatoires (CPGE) au Maroc mènent principalement aux **Grandes Écoles d'Ingénieurs** (via le Concours National Commun - CNC) et aux **Grandes Écoles de Management** (via le CNAEM).

Pour les filières scientifiques (MP, PC, PSI, TSI, etc.)

- **Concours National Commun (CNC)** : Accès aux meilleures écoles d'ingénieurs marocaines (EMI, ENSAM, INPT, EHTP, etc.).
- **Concours Français** : Écoles comme Polytechnique, CentraleSupélec, Mines-Ponts, ENS, etc., avec des épreuves organisées au Maroc.
- **Métiers** : Ingénieur (génie civil, informatique, mécanique, énergie, télécoms, etc.), enseignant, chercheur, métiers de la finance et de l'actuariat.

Pour les filières économiques et commerciales (ECS, ECT)

- **Concours National d'Accès aux Écoles de Management (CNAEM)**
- **IAE (Instituts d'Administration des Entreprises)** : Diplômes universitaires en management.
- **Concours Français** : Écoles de commerce et de management françaises (HEC, ESSEC, etc.).
- **Métiers** : Gestion, marketing, finance, ressources humaines, communication, entrepreneuriat.

3.7. Cartographie et effectifs

Les Classes Préparatoires aux Grandes Écoles (CPGE) sont dispensées dans différents types d'établissements au Maroc. Le secteur public regroupe plusieurs dizaines de lycées répartis sur l'ensemble du territoire national, avec un total de 29 centres accueillant plus de 290 classes publiques, dont 147 en première année et 143 en deuxième année. Parallèlement, le secteur privé propose également des CPGE dans des établissements agréés, principalement situés dans les grandes villes, avec près de 396 classes privées. Enfin, le dispositif de partenariat public-privé (PPP) contribue à l'offre de formation avec 34 classes supplémentaires, renforçant ainsi la diversité des structures d'accueil pour les élèves préparant les concours des grandes écoles.

Les **effectifs des étudiants en CPGE publics au Maroc** avoisinent actuellement **plus de 9323 élèves** répartis sur l'ensemble du territoire, avec une croissance régulière chaque année.

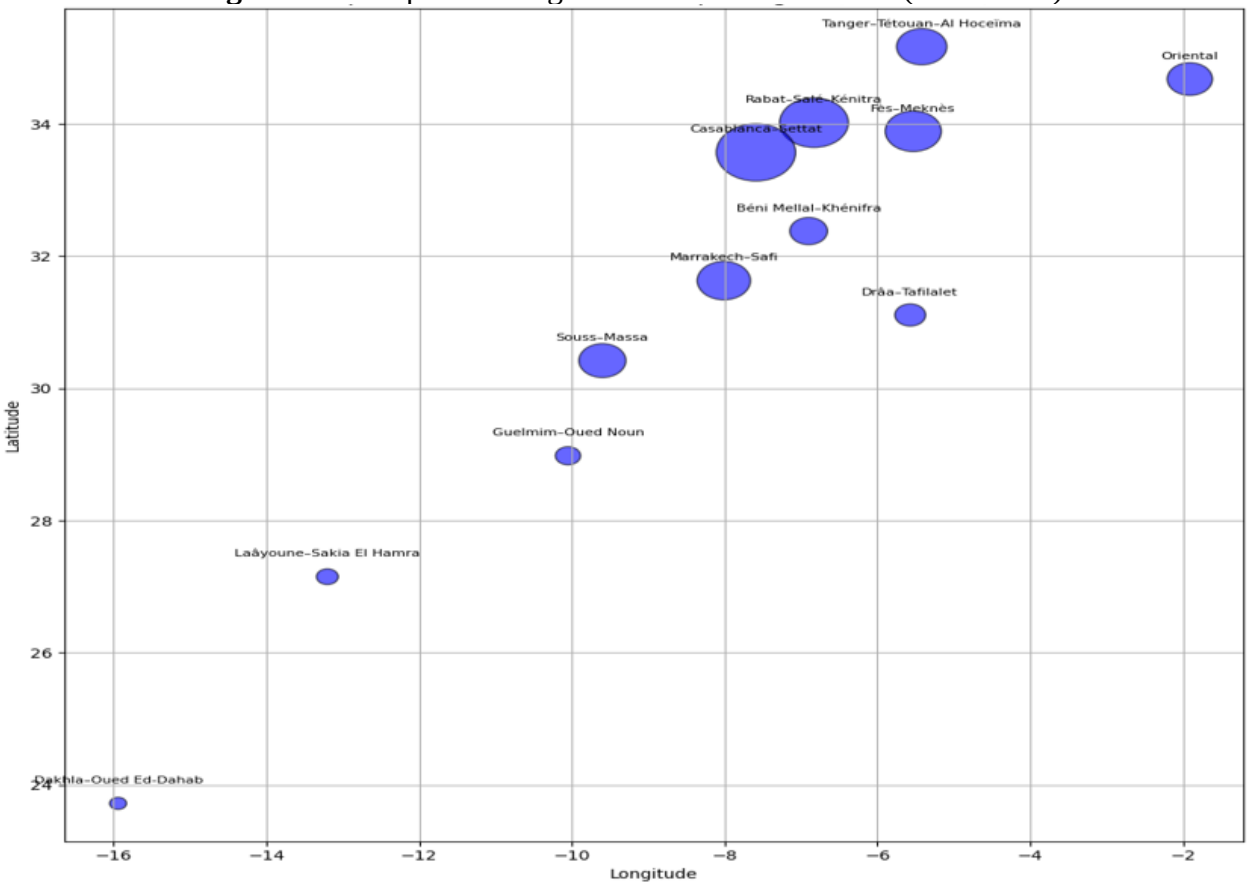
Tableau n° 6 : Offre globale en CPGE

	Effectif				**Pourcentage**		
	Public	**PPP**	**Privé**	**Total**	**Public**	**PPP**	**Privé**
1ére année	4985	376	1343	6702	74,4	5,6	20
2ème année	4338	352	1532	6224	69,7	5,7	24,6
Total général	9323	728	2875	12926	72,1	5,6	22,2

Source : Auteurs, Données de la Direction Générale de l'Action Pédagogique.

Le graphique ci-après illustre la répartition régionale des effectifs CPGE pour l'année 2024-2025.

Figure 1 : La répartition régionale des effectifs CPGE (2024-2025)



Source : Présentation auteurs, données www.cpge.ac.ma

3.8. Justification du choix des CPGE comme terrain d'étude

Les classes préparatoires aux grandes écoles (CPGE) constituent un cadre particulièrement pertinent pour analyser l'impact de l'intelligence artificielle (IA) dans l'éducation au Maroc, en raison de leurs spécificités institutionnelles, académiques et méthodologiques.

D'abord, les CPGE se distinguent par une sélectivité élevée et une exigence académique exceptionnelle. Réservées aux meilleurs bacheliers, elles concentrent une population d'élèves hautement motivés, soumis à un rythme intensif et à des évaluations fréquentes. Cette charge académique et pédagogique élevée rend l'usage de l'IA particulièrement stratégique, car elle offre un laboratoire d'innovation idéal pour tester le potentiel des outils technologiques en matière de personnalisation des apprentissages, de feedback et d'optimisation du temps des enseignants.

Ensuite, l'organisation nationale des CPGE, sous la tutelle directe du Ministère de l'Éducation Nationale, offre une standardisation stricte des programmes, des épreuves et des concours nationaux ou internationaux. Cette homogénéité des indicateurs de performance constitue un atout méthodologique majeur pour une étude économétrique. Elle permet de comparer objectivement et de manière rigoureuse les résultats entre les différents centres, filières et cohortes, garantissant ainsi la validité et la généralisation des conclusions quant à l'effet de l'IA sur la réussite scolaire et l'équité éducative.

Enfin, les CPGE jouent un rôle stratégique dans la formation de l'élite scientifique et économique du pays. Expérimenter l'intégration de l'IA dans ce cadre d'excellence permet non seulement d'observer son déploiement dans des conditions optimales, mais aussi d'anticiper son introduction future dans l'ensemble du système éducatif marocain, offrant ainsi des enseignements précieux pour l'orientation des politiques publiques.

3.9. État actuel de l'intégration de l'intelligence artificielle dans les CPGE marocaines

L'intégration de l'intelligence artificielle (IA) dans le système éducatif marocain s'inscrit dans une dynamique plus large de transformation numérique de l'enseignement. Toutefois, en ce qui concerne les Classes Préparatoires aux Grandes Écoles (CPGE), les données disponibles demeurent encore limitées et ne permettent pas de dresser un état des lieux exhaustif des pratiques effectives à l'échelle nationale.

À ce stade, il apparaît davantage pertinent de parler d'un processus d'appropriation progressive des outils fondés sur l'intelligence artificielle plutôt que d'une intégration institutionnalisée et homogène. Les usages observés relèvent principalement d'initiatives individuelles d'enseignants ou d'étudiants ainsi que d'expérimentations locales facilitées par le développement des plateformes numériques éducatives.

Du côté des étudiants, l'essor récent des outils d'IA générative a favorisé l'émergence de nouvelles pratiques d'apprentissage. Certains apprenants utilisent ces technologies comme outils d'assistance à la résolution de problèmes, d'explication de concepts complexes, de génération d'exercices complémentaires ou encore de préparation aux concours d'entrée aux grandes écoles. Ces usages demeurent toutefois largement informels et leur ampleur n'a pas encore fait l'objet d'une mesure systématique dans les CPGE marocaines.

Du côté des enseignants, plusieurs applications potentielles de l'intelligence artificielle peuvent être envisagées dans le cadre pédagogique : production de supports de cours, génération d'exercices différenciés, élaboration de synthèses documentaires, préparation de sujets d'évaluation ou assistance à la correction. Il convient néanmoins de souligner que ces pratiques correspondent principalement à des possibilités offertes par les technologies actuelles et non à des usages officiellement généralisés dans l'ensemble des centres de CPGE.

Par ailleurs, les politiques nationales de transformation numérique de l'éducation, notamment à travers les différents programmes de modernisation des infrastructures numériques et des environnements d'apprentissage, créent un contexte favorable à une diffusion progressive de ces technologies. Cependant, à ce jour, il n'existe pas de dispositif national dédié spécifiquement à l'intégration de l'intelligence artificielle dans les CPGE permettant de mesurer précisément le niveau d'adoption de ces outils selon les établissements ou les filières.

Cette situation justifie d'ailleurs l'intérêt scientifique de la présente recherche. L'absence d'indicateurs consolidés relatifs à l'utilisation de l'intelligence artificielle dans les CPGE marocaines renforce la nécessité de construire des instruments de mesure adaptés, tels que l'indice d'adoption de l'IA proposé dans cette étude. Celui-ci vise précisément à quantifier, de manière rigoureuse et comparable, le degré d'intégration de l'intelligence artificielle au sein des différents centres et filières.

Ainsi, l'intégration de l'IA dans les CPGE marocaines apparaît aujourd'hui comme un phénomène émergent caractérisé par une forte hétérogénéité des usages, des infrastructures et des pratiques pédagogiques. Cette phase de transition constitue un contexte particulièrement pertinent pour analyser les conditions et les effets potentiels de l'adoption de ces technologies sur la performance académique et l'équité éducative.

IV. Méthodologie économétrique

4.1. Positionnement méthodologique et cadre de recherche

4.1.1. Positionnement épistémologique

Cette recherche s'inscrit dans une approche pragmatique articulant les perspectives positiviste et constructiviste. D'une part, le paradigme positiviste considère que les effets de l'intelligence artificielle peuvent être mesurés à travers des indicateurs observables tels que les performances académiques, les taux de réussite ou les inégalités éducatives. D'autre part, la perspective constructiviste souligne que les usages de l'IA résultent de processus sociaux dépendant des pratiques pédagogiques, des choix institutionnels et des représentations des acteurs éducatifs. Cette

complémentarité autorise une modélisation quantitative rigoureuse tout en tenant compte de la complexité du contexte éducatif.

4.1.2. Nature de l'étude

L'étude repose sur la conception d'un cadre économétrique théorique destiné à analyser l'impact de l'intelligence artificielle dans les CPGE marocaines. En l'absence de base de données actuellement disponible à l'échelle nationale, la recherche propose une stratégie empirique susceptible d'être mobilisée dans de futurs travaux d'évaluation.

4.2. Données, unités d'analyse et construction des variables

4.2.1. Population et unité d'observation

- Population étudiée : étudiants et enseignants des CPGE marocaines.
- Unité d'analyse : centre-filière-période.
- Horizon temporel : 2018-2025 : La période d'observation couvre les années académiques 2018-2019 à 2024-2025, soit sept années. Ce choix répond à trois exigences. Premièrement, la diffusion massive des outils d'IA générative auprès du grand public date de la fin de l'année 2022, avec le lancement de ChatGPT en novembre 2022. Les années 2018-2019 à 2021-2022 constituent donc une pré-période de quatre ans, avant cette diffusion. Cette pré-période est nécessaire pour estimer les coefficients pré-traitement de l'event study et tester l'hypothèse de tendances parallèles.
- Niveau d'observation : semestre ou année académique.

4.2.2. Sources de données

Les données mobilisées pourraient provenir de plusieurs sources complémentaires :

- Bases administratives des CPGE ;
- Données des AREF ;
- Résultats des concours nationaux ;
- Indicateurs d'infrastructures numériques ;
- Enquêtes auprès des enseignants et étudiants.

4.2.3. Variable explicative : indice d'adoption de l'IA

La variable explicative principale de cette recherche est un **indice synthétique d'adoption de l'intelligence artificielle** (IA_Index_{cft}), construit afin de mesurer l'intensité de l'intégration de l'IA au sein d'un centre de CPGE **c**, d'une filière **f** et pour une période donnée **t**. Cette approche permet de dépasser une vision binaire de l'adoption technologique en tenant compte de la diversité des usages, des ressources et des dispositifs institutionnels associés à l'intelligence artificielle.

L'indice est défini comme une combinaison pondérée de plusieurs indicateurs standardisés :

$$IA_Index_{cft} = \sum_{k=1}^{K} w_k Z_{k,cft}$$

$$\sum_{k=1}^{K}$$

Avec :

où :

- IA_Index_{cft} : indice d'intelligence artificielle pour l'observation (c,f,t),
- w_k: poids associé à l'indicateur k,
- $Z_{k,cft}$: valeur standardisée de l'indicateur k pour l'observation (c,f,t),
- $\sum_k$: somme sur l'ensemble des indicateurs k.

La construction de cet indice repose sur une approche multidimensionnelle intégrant les principaux facteurs susceptibles de refléter l'usage effectif de l'intelligence artificielle dans les CPGE marocaines. Quatre dimensions sont particulièrement considérées. La première concerne les usages pédagogiques de l'IA par les enseignants, notamment la production de supports pédagogiques assistés par l'IA, l'élaboration d'exercices personnalisés ou encore la génération de feedbacks automatisés. La deuxième dimension renvoie aux usages développés par les étudiants, tels que l'auto-évaluation assistée, l'aide à la résolution d'exercices, le tutorat intelligent ou les outils

d'accompagnement à l'apprentissage. La troisième dimension porte sur les infrastructures numériques, incluant la qualité de la connectivité, le niveau d'équipement informatique et l'accès aux plateformes numériques nécessaires à l'exploitation des solutions d'IA. Enfin, la quatrième dimension concerne la gouvernance institutionnelle, mesurée à travers l'existence de chartes d'usage, de programmes de formation ou d'initiatives institutionnelles favorisant l'intégration de ces technologies.

L'agrégation de ces différentes composantes peut être réalisée selon deux approches complémentaires. La première repose sur l'attribution de pondérations expertes, fondées sur les recommandations d'acteurs institutionnels et de spécialistes des technologies éducatives. La seconde s'appuie sur une analyse en composantes principales (ACP), permettant de déterminer empiriquement les poids associés à chaque indicateur en fonction de leur contribution à la variance totale observée. Cette seconde approche présente l'avantage de limiter l'arbitraire dans la construction de l'indice et de renforcer sa cohérence statistique.

Afin d'assurer la comparabilité des mesures, l'ensemble des indicateurs élémentaires est préalablement standardisé sous forme de scores centrés-réduits. Cette standardisation permet d'éliminer les différences d'échelle entre variables et d'éviter qu'un indicateur présentant une variance élevée ne domine artificiellement la construction de l'indice. Les valeurs sont ainsi exprimées relativement à leur distribution au sein des centres, filières et périodes considérés.

Enfin, plusieurs procédures seront mobilisées pour garantir la validité et la fiabilité de l'indice d'adoption de l'IA. La cohérence interne des composantes sera évaluée à l'aide du coefficient alpha de Cronbach. La validité convergente sera examinée en comparant l'indice obtenu avec d'autres mesures observables de l'usage de l'IA, telles que les journaux d'activité numériques, les taux de participation aux formations dédiées ou les données d'utilisation des plateformes concernées. En complément, des analyses factorielles exploratoires permettront de vérifier que les différents indicateurs retenus reflètent bien une même dimension sous-jacente liée au degré d'intégration de l'intelligence artificielle. Ces différentes étapes visent à assurer que l'indice constitue une mesure robuste, fiable et pertinente de l'adoption de l'IA dans les CPGE marocaines.

4.2.4. Variables dépendantes

- Performance académique: moyenne par matière, score composite, rang intra-centre, progression semestrielle.
- Concours: taux d'admissibilité/admission par filière/école.
- Engagement et régularité: absentéisme, redoublement/abandon.
- Équité éducative: écarts de genre, statut boursier, origine géographique.

4.2.5. Variables de contrôle Xcft:

- Pédagogiques: taille de classe, ratio élèves/enseignant, volume de khôlles, expérience des enseignants.
- Curriculum: heures/coefficients par matière.
- Socioéconomiques: part de boursiers, proxy de mix social, localisation.

4.2.6. Qualité des données et validation des mesures

Une attention particulière sera accordée à la qualité des données mobilisées ainsi qu'à la validité des mesures utilisées dans l'analyse économétrique. Cette étape est essentielle afin de garantir la robustesse des résultats et la crédibilité des conclusions relatives à l'impact de l'intelligence artificielle sur les performances académiques dans les CPGE marocaines.

En premier lieu, la construction de l'indice d'adoption de l'intelligence artificielle (IA_Index_{cft}) fera l'objet d'une procédure de validation rigoureuse. La cohérence interne des différentes composantes de l'indice sera évaluée à l'aide du coefficient alpha de Cronbach, permettant de vérifier dans quelle mesure les indicateurs retenus mesurent une même dimension latente liée à l'intégration de l'IA dans les pratiques pédagogiques et organisationnelles.

En deuxième lieu, une **analyse en composantes principales (ACP)** sera mobilisée afin d'examiner la structure factorielle de l'indice et, le cas échéant, de déterminer des pondérations empiriques pour les différentes composantes. Cette démarche permettra d'identifier les dimensions les plus contributives à la variance observée et de limiter le caractère arbitraire des pondérations attribuées aux indicateurs élémentaires.

En troisième lieu, la **validité convergente** de l'indice sera examinée à travers sa corrélation avec d'autres mesures observables de l'usage de l'intelligence artificielle, notamment les journaux d'activité numériques, les données de connexion aux plateformes mobilisant l'IA, ainsi que la participation des enseignants et des étudiants aux formations dédiées à ces technologies. Une association positive et significative entre ces indicateurs constituera un élément de validation de la mesure proposée.

Par ailleurs, les **données manquantes** feront l'objet d'un traitement spécifique afin de limiter les biais potentiels. Lorsque cela sera justifié, des méthodes d'imputation prudentes seront mises en œuvre et complétées par la création d'indicateurs de disponibilité des données. Des analyses de sensibilité permettront également de vérifier la stabilité des résultats selon les différentes hypothèses de traitement des valeurs manquantes.

Enfin, l'ensemble des **variables de résultat** sera harmonisé afin de garantir leur comparabilité entre centres, filières et périodes. Les notes académiques seront notamment transformées en **scores standardisés (z-scores)** par matière et par centre, puis agrégées lorsque nécessaire sous forme d'indicateurs composites tenant compte des coefficients propres aux différentes filières des CPGE. Cette standardisation vise à neutraliser les écarts de notation entre établissements et à assurer une interprétation homogène des performances observées.

Ainsi, la combinaison de procédures de validation statistique, de contrôle de la qualité des données et d'harmonisation des variables contribue à renforcer la fiabilité des mesures utilisées et la robustesse des analyses économétriques proposées.

4.3. Stratégie d'identification causale

L'estimation de l'effet causal de l'IA se heurte à plusieurs défis méthodologiques, notamment les biais de sélection, l'endogénéité de l'adoption technologique, les hétérogénéités inobservées et les effets de diffusion entre établissements. Afin de répondre à ces défis, la stratégie empirique repose sur plusieurs méthodes complémentaires.

4.3.1. Modèle de panel à effets fixes

L'estimation de l'impact de l'intelligence artificielle sur les performances académiques des étudiants en classes préparatoires aux grandes écoles (CPGE) nécessite une méthodologie capable de prendre en compte l'hétérogénéité des contextes éducatifs. En effet, les centres et les filières présentent des caractéristiques propres susceptibles d'influencer simultanément l'adoption de l'IA et les résultats académiques. Afin de contrôler ces différences structurelles et d'isoler au mieux l'effet propre de l'intelligence artificielle, cette recherche mobilise un modèle de données de panel à effets fixes.

Le modèle économétrique de référence s'écrit comme suit :

$$\mathbf{EduOutcome_{cft}=\beta\ IA_Index_{cft}+\gamma' X_{cft}+\alpha_{cf}+\delta_t+\varepsilon_{cft}}$$

où :

- $EduOutcome_{cft}$ représente la variable de résultat observée pour le centre c, la filière f et la période t (performance académique, rang, progression, admissibilité aux concours, etc.) ;
- IA_Index_{cft} désigne l'indice synthétique d'adoption de l'intelligence artificielle ;
- X_{cft} correspond au vecteur des variables de contrôle observables ;
- B mesure l'effet moyen de l'adoption de l'IA sur la variable de résultat considérée ;
- γ est le vecteur des paramètres associés aux variables de contrôle ;
- α_{cf} représente les effets fixes spécifiques à chaque couple centre-filière ;
- δ_t désigne les effets fixes temporels communs à l'ensemble des observations ;

- ε_{cft} est le terme d'erreur idiosyncratique.

Les variables de contrôle X_{cft} regroupent notamment les caractéristiques pédagogiques des classes (taille des effectifs, ratio élèves-enseignant, volume de khôlles, expérience des enseignants), les variables liées au curriculum (volume horaire, coefficients des matières) ainsi que différents indicateurs socioéconomiques tels que la proportion de boursiers, la composition sociale des effectifs ou la localisation géographique des établissements.

Le recours à un modèle de panel à effets fixes apparaît particulièrement pertinent dans le contexte des CPGE marocaines. Ces établissements se distinguent par une forte hétérogénéité en matière de ressources, d'encadrement pédagogique, de qualité des infrastructures ou encore de sélection des étudiants. Une part importante de ces caractéristiques demeure difficilement observable ou quantifiable, mais reste relativement stable dans le temps. Il s'agit notamment de la réputation des centres, de leur culture organisationnelle, de leurs pratiques d'enseignement ou de leur capacité historique à préparer les étudiants aux concours.

Si ces facteurs ne sont pas correctement pris en compte, une simple comparaison entre établissements fortement utilisateurs de l'IA et établissements faiblement utilisateurs risquerait d'attribuer à l'intelligence artificielle des écarts de performance qui résultent en réalité de différences préexistantes. L'introduction d'effets fixes permet de neutraliser ces caractéristiques inobservées mais constantes dans le temps. L'identification du paramètre β repose ainsi sur les variations de l'utilisation de l'IA observées au sein d'un même centre-filière au cours du temps, plutôt que sur des comparaisons transversales potentiellement biaisées.

Sur le plan scientifique, cette approche s'inscrit dans la littérature économétrique consacrée à l'évaluation des politiques éducatives et des innovations pédagogiques. Les modèles à effets fixes constituent une méthode de référence lorsqu'il s'agit d'analyser des données longitudinales caractérisées par des hétérogénéités inobservées susceptibles d'être corrélées avec les variables explicatives. Dans le cas présent, ils permettent de réduire le biais d'omission lié aux caractéristiques permanentes des établissements et d'améliorer la crédibilité de l'interprétation causale des résultats.

Afin de renforcer davantage la robustesse des estimations, le modèle pourra être enrichi par l'introduction de tendances temporelles spécifiques aux centres-filières :

$$\mathbf{EduOutcome_{cft}=\beta\ IA_Index_{cft}+\gamma' X_{cft}+\alpha_{cf}+\delta t+\lambda_{cf} t+\varepsilon_{cft}}$$

Où :

$\lambda_{cf}\,\mathbf{t}$ capture les trajectoires propres à chaque couple centre-filière. Cette extension permet de tenir compte du fait que certains établissements peuvent connaître des évolutions particulières indépendantes de l'adoption de l'intelligence artificielle, telles que des réformes internes, des changements de direction ou des améliorations progressives des pratiques pédagogiques.

Ainsi, le modèle de panel à effets fixes constitue le socle de la stratégie d'identification retenue dans cette recherche. Il offre un cadre rigoureux pour analyser l'impact de l'intelligence artificielle dans les CPGE marocaines en contrôlant les facteurs inobservés permanents et en exploitant la dimension longitudinale des données. Son utilisation vise à fournir une estimation plus fiable de l'effet de l'IA sur la performance académique, tout en constituant une base solide pour les extensions méthodologiques développées dans les sections suivantes, notamment les modèles en différences-en-différences et les approches par variables instrumentales.

4.3.2. Modèle en différences-en-différences

L'adoption de l'intelligence artificielle au sein des classes préparatoires aux grandes écoles (CPGE) marocaines ne s'opère ni simultanément ni uniformément entre les établissements. Certains centres ou filières intègrent précocement les outils d'IA dans leurs pratiques pédagogiques, tandis que d'autres les adoptent plus tardivement ou à des degrés différents. Cette hétérogénéité temporelle constitue un cadre particulièrement propice à l'utilisation de la méthode des **différences-en-différences** (*Difference-in-Differences*, DiD), largement mobilisée dans les travaux d'évaluation des politiques publiques et des innovations éducatives.

Le principe de cette approche consiste à comparer l'évolution des performances académiques des unités ayant adopté l'IA, constituant le groupe traité, à celle des unités n'ayant pas encore adopté ces technologies, servant de groupe de contrôle. L'effet de l'IA est alors identifié à partir des différences d'évolution observées entre ces deux groupes avant et après l'introduction du traitement.
Le modèle de base peut être formulé de la manière suivante :

$$\mathbf{EduOutcome_{cft}=\theta(Post_t \times Treated_{cf})+\lambda' X_{cft}+\alpha_{cf}+\delta_t+u_{cft}}$$

où :
- $EduOutcome_{cft}$ désigne la variable de résultat observée pour le centre c, la filière f et la période t;
- Treatedcf est une variable indicatrice prenant la valeur 1 pour les centres-filières ayant adopté l'IA et 0 sinon ;
- Postt est une variable temporelle indiquant les périodes postérieures à l'introduction de l'IA ;
- Postt×Treatedcf représente le terme d'interaction caractérisant l'exposition au traitement ;
- Xcft correspond au vecteur des variables de contrôle observables ;
- αcf désigne les effets fixes propres à chaque couple centre-filière ;
- δt représente les effets fixes temporels communs à l'ensemble des observations ;
- ucft correspond au terme d'erreur ;
- θ mesure l'effet moyen causal de l'adoption de l'intelligence artificielle sur la variable de résultat étudiée.

L'identification du paramètre θ repose sur une hypothèse fondamentale : celle des **tendances parallèles**. Cette hypothèse suppose qu'en l'absence d'adoption de l'intelligence artificielle, les trajectoires des groupes traités et non traités auraient évolué de manière similaire au cours du temps. Dans ce cas, toute divergence observée après l'introduction de l'IA peut être attribuée à l'effet du traitement plutôt qu'à des différences structurelles préexistantes entre les groupes.
Dans le contexte des CPGE marocaines, cette hypothèse est particulièrement plausible dès lors que les centres sont soumis à un cadre institutionnel commun, à des programmes nationaux harmonisés et à des modalités de sélection relativement standardisées. Néanmoins, cette hypothèse ne peut être présumée et doit être vérifiée empiriquement. À cette fin, des analyses de pré-tendances seront réalisées afin d'examiner les évolutions des résultats académiques avant l'adoption de l'IA. L'absence de différences statistiquement significatives entre les trajectoires préalables des groupes constituera un élément favorable à la validité de la stratégie d'identification retenue.
Afin de compléter l'approche DiD traditionnelle, une analyse de type **event study** sera également mise en œuvre pour étudier la dynamique temporelle des effets de l'intelligence artificielle. Cette spécification permet d'estimer séparément l'impact du traitement à différentes dates relativement à son introduction et d'observer l'évolution des effets avant et après l'adoption.
Le modèle peut être formulé comme suit :

$$EduOutcome_{cft} = \sum_{\tau \neq -1} \theta_\tau D^\tau_{cf,t} + \lambda' X_{cft} + \alpha_{cf} + \delta_t + u_{cft}$$

où $D^\tau_{cf,t}$ indique le nombre de périodes écoulées avant ou après l'introduction de l'IA dans le centre-filière considéré. Les coefficients θ_τ permettent alors de retracer l'évolution de l'impact de l'IA au fil du temps.
L'approche *event study* présente un double intérêt. D'une part, elle offre un test graphique et statistique de l'hypothèse des tendances parallèles en examinant la significativité des coefficients précédant l'adoption du traitement. D'autre part, elle permet d'analyser la temporalité des effets de l'IA et de distinguer les impacts immédiats des effets de moyen ou long terme. Il est notamment envisageable que les bénéfices associés à l'intelligence artificielle ne se manifestent qu'après une période d'apprentissage et d'appropriation des outils par les enseignants et les étudiants. Dans cette perspective, des coefficients post-traitement croissants pourraient traduire l'existence d'effets cumulatifs liés à l'accumulation d'expérience et à la diffusion progressive des usages de l'IA.
Ainsi, la méthode des différences-en-différences constitue un complément naturel au modèle de panel à effets fixes. Alors que ce dernier exploite principalement la variation intra-unité dans le

temps, l'approche DiD permet d'exploiter explicitement l'adoption progressive de l'intelligence artificielle observée entre les centres et les filières. Elle renforce ainsi la capacité d'identification causale du dispositif empirique et fournit une estimation plus crédible de l'impact de l'IA sur les performances académiques dans les CPGE marocaines.

4.3.3. Variables instrumentales (2SLS)

Bien que les modèles à effets fixes et les approches en différences-en-différences permettent de réduire une large partie des biais d'estimation, l'identification de l'effet causal de l'intelligence artificielle peut demeurer confrontée à des problèmes d'endogénéité. En effet, l'adoption de l'IA n'est généralement pas un phénomène aléatoire. Les centres les mieux dotés en ressources, disposant d'infrastructures numériques plus développées ou bénéficiant d'une capacité d'innovation pédagogique plus importante sont également susceptibles d'obtenir de meilleures performances académiques indépendamment de l'usage de l'IA. Dans ce contexte, une corrélation positive observée entre l'intégration de l'intelligence artificielle et les résultats des étudiants pourrait refléter, au moins partiellement, ces caractéristiques préexistantes plutôt qu'un véritable effet causal de la technologie.

Afin de traiter ce problème, cette recherche mobilise une approche par variables instrumentales estimée selon la méthode des moindres carrés en deux étapes (*Two-Stage Least Squares*, 2SLS). Cette méthode permet d'exploiter une source de variation exogène de l'adoption de l'IA afin d'identifier son effet causal sur les performances académiques.

Première étape : modélisation de l'adoption de l'IA

La première étape consiste à expliquer le niveau d'adoption de l'intelligence artificielle à partir d'un ou plusieurs instruments exogènes :

$$\mathbf{IA_Index_{cft}=\pi_1 Z_{cft}+\pi' X_{cft}+\alpha_{cf}+\delta t+\nu_{cft}}$$

où :

- IA_Index_{cft} représente l'indice d'adoption de l'intelligence artificielle ;
- Z_{cft} désigne le ou les instruments utilisés ;
- X_{cft} correspond au vecteur des variables de contrôle observables ;
- α_{cf} représente les effets fixes centre-filière ;
- δt désigne les effets fixes temporels ;
- ν_{cft} est le terme d'erreur de première étape.

Cette estimation permet d'extraire la composante de l'adoption de l'IA qui est expliquée par des facteurs exogènes et donc indépendante des déterminants non observés susceptibles d'influencer simultanément les résultats académiques.

Seconde étape : estimation de l'effet causal de l'IA

Dans un second temps, la variable observée IA_Index_{cft} est remplacée par sa valeur prédite lors de la première étape, notée :

$$\widehat{IA_Index}_{cft}$$

Le modèle estimé devient alors :

$$EduOutcome_{cft} = \beta^{IV}\widehat{IA_Index}_{cft} + \gamma' X_{cft} + \alpha_{cf} + \delta_t + \varepsilon_{cft}$$

où :

- $EduOutcome_{cft}$ représente l'indicateur de performance éducative considéré ;
- $\widehat{IA_Index}_{cft}$ est la composante exogène de l'adoption de l'IA issue de la première étape ;
- β^{IV} mesure l'effet causal de l'intelligence artificielle sur la performance académique ;
- ε_{cft} correspond au terme d'erreur.

L'interprétation de β^{IV} diffère légèrement de celle obtenue par les méthodes classiques. Ce coefficient estime l'impact de l'IA pour les unités dont l'adoption est influencée par les instruments retenus, offrant ainsi une estimation plus robuste face aux problèmes d'endogénéité.

Choix des instruments

Le choix des instruments constitue l'élément central de cette stratégie d'identification. Un instrument valide doit satisfaire deux conditions : être fortement corrélé à l'adoption de l'IA (condition de pertinence) et ne pas exercer d'effet direct sur les performances académiques en dehors de son influence sur l'usage de l'IA (condition d'exclusion).

Dans le contexte des CPGE marocaines, plusieurs instruments potentiels peuvent être envisagés.

Le premier concerne le calendrier administratif des formations à l'intelligence artificielle organisées par les Académies Régionales d'Éducation et de Formation (AREF). Les dates de déploiement de ces formations résultent souvent de contraintes administratives et organisationnelles extérieures aux performances propres des établissements. Elles peuvent néanmoins influencer significativement la vitesse d'adoption des outils d'IA par les équipes pédagogiques.

Le deuxième instrument potentiel repose sur le niveau de développement des infrastructures numériques locales, notamment le calendrier de raccordement à la fibre optique, l'extension des réseaux 4G et 5G ou l'accessibilité aux infrastructures de télécommunication. Ces facteurs conditionnent fortement les possibilités techniques d'utilisation de l'IA tout en étant généralement indépendants des résultats académiques des étudiants.

Enfin, des dotations externes ou partenariats technologiques accordés à certains établissements peuvent également constituer des instruments plausibles lorsqu'ils résultent de décisions institutionnelles ou de programmes nationaux indépendants des performances scolaires observées.

Justification économique de l'approche

L'utilisation des variables instrumentales apparaît particulièrement pertinente dans le contexte des CPGE marocaines en raison du caractère potentiellement sélectif de l'adoption de l'intelligence artificielle. Les établissements les plus performants sont souvent ceux qui disposent de ressources financières, humaines et technologiques facilitant l'intégration rapide des innovations pédagogiques. Dès lors, une estimation conventionnelle risque de surestimer l'effet de l'IA en capturant simultanément l'influence de ces avantages préexistants.

L'approche IV permet de contourner cette difficulté en exploitant uniquement la variation exogène de l'adoption de l'IA. Elle renforce ainsi la crédibilité de l'interprétation causale et fournit une estimation moins sensible aux biais de sélection et aux variables omises. Dans une perspective d'évaluation des politiques éducatives, cette méthode constitue un complément essentiel aux modèles à effets fixes et aux estimations en différences-en-différences, particulièrement lorsque l'innovation étudiée est adoptée progressivement par des établissements présentant des caractéristiques initiales différentes.

La validité empirique des instruments sera vérifiée à l'aide de plusieurs tests diagnostiques. La pertinence des instruments sera évaluée à partir de la statistique F de la première étape, dont la valeur devra dépasser le seuil généralement admis de 10 afin de limiter le risque d'instruments faibles. En présence d'hétéroscédasticité ou d'erreurs standards clusterisées, la pertinence des instruments pourra également être évaluée à l'aide de la statistique de Kleibergen-Paap, plus adaptée que la statistique F conventionnelle. Lorsque plusieurs instruments seront mobilisés simultanément, des tests de sur-identification, notamment le test de Hansen, permettront d'examiner la plausibilité de l'hypothèse d'exclusion. Ces vérifications contribueront à garantir la robustesse et la crédibilité des estimations obtenues par la méthode des variables instrumentales.

4.4. Analyse de l'hétérogénéité des effets

Au-delà de l'estimation de l'effet moyen de l'intelligence artificielle sur les performances académiques, il apparaît essentiel d'examiner si cet effet varie selon les caractéristiques des étudiants, des filières ou des établissements. En effet, les CPGE marocaines se caractérisent par une forte diversité des profils scolaires et socioéconomiques. Les étudiants diffèrent notamment par leur niveau académique initial, leur genre, leur statut de boursier, leur origine géographique ou encore

leur appartenance à différentes filières scientifiques, technologiques et économiques. Dans ce contexte, l'hypothèse d'un effet uniforme de l'IA sur l'ensemble des apprenants apparaît restrictive. L'analyse de l'hétérogénéité vise donc à identifier les catégories d'étudiants ou de filières pour lesquelles l'usage de l'intelligence artificielle génère les effets les plus importants. Cette démarche présente un intérêt majeur tant sur le plan scientifique que sur le plan des politiques éducatives, puisqu'elle permet d'évaluer dans quelle mesure l'IA contribue à réduire ou, au contraire, à accentuer certaines inégalités scolaires.

4.4.1. Modèles d'interaction

Une première approche consiste à introduire dans le modèle économétrique des termes d'interaction entre l'indice d'adoption de l'intelligence artificielle et différentes caractéristiques des étudiants ou des filières. Le modèle général peut être formulé de la manière suivante :

$$EduOutcome_{cft} = \beta\, IA_Index_{cft} + \sum_g \phi g (IA_Index_{cft} \times Group_g) + \gamma' X_{cft} + \alpha cf + \delta_t + \varepsilon_{cft}$$

où $Group_g$ représente une caractéristique particulière du groupe étudié et ϕg mesure l'effet différentiel associé à cette caractéristique.

Plusieurs interactions pourront être examinées :

IA_Index×Genre

IA_Index×Boursier

IA_Index×Filière

Ces interactions permettent d'évaluer si les bénéfices associés à l'utilisation de l'intelligence artificielle diffèrent selon le genre, le statut socioéconomique ou le type de filière fréquentée. Elles contribuent ainsi à identifier les catégories d'étudiants les plus susceptibles de tirer profit de ces technologies.

Par exemple, un coefficient d'interaction positif associé à la variable « boursier » indiquerait que l'IA produit un effet plus important pour les étudiants bénéficiant d'une aide sociale. De même, une interaction significative entre l'IA et certaines filières pourrait révéler que les outils d'intelligence artificielle sont particulièrement adaptés à certains contextes pédagogiques ou disciplines académiques.

Cette analyse constitue également un outil pertinent pour évaluer les enjeux d'équité éducative. Elle permet notamment de déterminer si l'intelligence artificielle contribue à réduire les écarts de performance entre groupes d'étudiants ou si elle profite davantage à des populations déjà favorisées.

4.4.2. Régressions quantiles

L'analyse des interactions permet d'étudier les différences entre groupes observables. Toutefois, elle ne renseigne pas sur la manière dont l'impact de l'IA varie selon le niveau de performance académique des étudiants. Or, il est possible que l'intelligence artificielle exerce des effets distincts sur les étudiants les moins performants et sur les étudiants les plus performants.

Afin d'examiner cette dimension, cette recherche mobilise des modèles de régression quantile. Contrairement aux modèles usuels estimés par les moindres carrés ordinaires, qui mesurent uniquement l'effet moyen de la variable explicative, les régressions quantiles permettent d'estimer l'effet de l'IA sur différents points de la distribution des performances académiques.

Le modèle peut être exprimé comme suit :

$$Q_\tau(EduOutcome_{cft}|.) = \beta_\tau IA_Index_{cft} + \gamma_\tau' X_{cft}$$

où :

- $Q_\tau(EduOutcome_{cft}|.)$ représente le τ-ième quantile conditionnel de la variable de résultat ;
- β_τ mesure l'effet de l'intelligence artificielle sur ce quantile particulier ;
- X_{cft} désigne l'ensemble des variables de contrôle.

L'estimation de plusieurs quantiles, par exemple les 10e, 25e, 50e, 75e et 90e percentiles, permet d'étudier la manière dont l'impact de l'IA varie le long de la distribution des performances.

Cette approche est particulièrement pertinente dans le contexte des CPGE marocaines. D'une part, les étudiants présentent des niveaux académiques très hétérogènes, allant des apprenants en

difficulté à ceux affichant les meilleurs résultats aux concours. D'autre part, l'intelligence artificielle peut produire des effets différenciés selon les besoins pédagogiques des apprenants.

Ainsi, si les coefficients estimés sont plus élevés dans les quantiles inférieurs de la distribution, cela suggérerait que l'IA bénéficie davantage aux étudiants en difficulté en favorisant le rattrapage scolaire ou la personnalisation des apprentissages. À l'inverse, des effets plus importants dans les quantiles supérieurs indiqueraient que les étudiants déjà performants tirent davantage parti de ces technologies, ce qui pourrait contribuer à renforcer les écarts existants.

L'intérêt principal des régressions quantiles réside donc dans leur capacité à mettre en évidence les effets distributionnels de l'intelligence artificielle. Elles permettent de dépasser l'analyse des effets moyens et d'apporter des éléments de réponse à une question centrale de cette recherche : l'IA constitue-t-elle un levier de réduction des inégalités éducatives ou tend-elle au contraire à accentuer les écarts de performance entre étudiants ?

L'association des modèles d'interaction et des régressions quantiles offre ainsi une vision particulièrement riche des effets de l'intelligence artificielle au sein des CPGE marocaines. Alors que les interactions identifient les différences entre catégories d'étudiants, les quantiles permettent de comprendre comment ces effets se distribuent selon les niveaux de performance académique. Cette double approche contribue à évaluer non seulement l'efficacité de l'IA, mais également ses implications en matière d'équité et d'inclusion éducative.

4.5. Analyse des mécanismes de transmission

Au-delà de l'estimation de l'effet global de l'introduction des outils d'intelligence artificielle sur les performances académiques des étudiants en classes préparatoires aux grandes écoles (CPGE), il est essentiel d'identifier les mécanismes par lesquels cet effet se matérialise. L'IA n'agit pas directement sur les résultats scolaires ; son influence transite par plusieurs canaux intermédiaires susceptibles de modifier les pratiques d'apprentissage, l'organisation pédagogique et l'accès aux ressources éducatives. L'analyse des mécanismes de transmission vise ainsi à décomposer l'effet total observé afin d'identifier la part attribuable à chacun de ces canaux et de mieux comprendre les conditions sous lesquelles l'IA améliore la réussite académique.

4.5.1. Modèles de médiation

L'étude des mécanismes de transmission repose sur une approche de médiation causale permettant d'évaluer dans quelle mesure l'effet de l'adoption de l'IA est transmis par des variables intermédiaires. Soit M_{ict} une variable de médiation représentant l'un des canaux étudiés. **La première étape** consiste à estimer l'effet du traitement sur cette variable :

$$\mathbf{M_{ict}=\alpha+\delta IA_{ict}+X_{ict}'\gamma+\mu_c+\lambda_t+\varepsilon_{ict}}$$

où IA_{ict} mesure l'intensité d'utilisation de l'intelligence artificielle pour l'étudiant i, dans le centre c, à la période t, X_{ict} représente l'ensemble des variables de contrôle, tandis que μ_c et λt désignent respectivement les effets fixes de centre et de période.

La seconde étape consiste à introduire simultanément le traitement et la variable médiatrice dans l'équation de résultat :

$$\mathbf{Y_{ict}=\alpha+\beta IA_{ict}+\theta M_{ict}+X'_{ict}\gamma+\mu_c+\lambda_t+\varepsilon_{ict}}$$

où Y_{ict} représente l'indicateur de performance académique considéré (notes, admissibilité ou classement). Le coefficient θ mesure l'effet du mécanisme de transmission sur le résultat final, tandis que la comparaison entre l'effet total de l'IA et son effet direct conditionnel permet d'évaluer l'importance relative du canal de médiation étudié.

Cette démarche est reproduite séparément pour chacun des mécanismes identifiés afin de déterminer lesquels jouent le rôle le plus important dans la relation entre utilisation de l'IA et réussite académique.

4.5.2. Canaux étudiés

Quatre mécanismes principaux sont examinés dans cette étude.

Le premier concerne la **personnalisation des apprentissages**. Les outils d'IA permettent d'adapter les contenus, les exercices et les recommandations pédagogiques au niveau et aux besoins spécifiques de chaque étudiant. Cette personnalisation peut accroître l'efficacité des apprentissages en identifiant plus rapidement les lacunes, en proposant des exercices ciblés et en ajustant le rythme de progression aux capacités individuelles.
Le deuxième canal est le **feedback pédagogique**. Les systèmes d'IA sont susceptibles de fournir des retours quasi instantanés sur les exercices réalisés, les erreurs commises ou les stratégies de résolution adoptées. Cette rétroaction rapide favorise la correction précoce des difficultés, renforce l'apprentissage par essai-erreur et améliore la compréhension des notions complexes.
Le troisième mécanisme correspond à la **réduction de la charge enseignante**. En automatisant certaines tâches répétitives telles que la correction d'exercices, la préparation de supports pédagogiques ou le suivi administratif, l'IA peut libérer du temps pour les enseignants. Ce temps supplémentaire peut être réalloué à des activités à plus forte valeur pédagogique, notamment l'accompagnement individualisé des étudiants et le suivi des élèves en difficulté.
Enfin, le quatrième canal concerne l'**accès aux ressources éducatives**. Les outils d'IA facilitent l'accès à une grande variété de contenus pédagogiques, d'explications complémentaires, de banques d'exercices et de supports adaptés aux objectifs de préparation aux concours. Cette amélioration de l'accès à l'information peut réduire certaines inégalités liées à la disponibilité des ressources et favoriser une préparation plus efficace aux épreuves.
L'analyse conjointe de ces différents mécanismes permet de déterminer si l'effet observé de l'intelligence artificielle résulte principalement d'une amélioration directe des processus d'apprentissage, d'une transformation des pratiques pédagogiques ou d'un élargissement des opportunités d'accès aux ressources éducatives. Cette compréhension est essentielle pour orienter les politiques d'intégration de l'IA dans les CPGE et maximiser ses bénéfices potentiels sur la réussite des étudiants.

4.5.3. Modèles d'équations structurelles

L'analyse des mécanismes de transmission peut être approfondie à l'aide de modèles d'équations structurelles (Structural Equation Modeling, SEM), particulièrement adaptés lorsque plusieurs variables médiatrices interviennent simultanément dans la relation entre l'utilisation de l'intelligence artificielle et la performance académique des étudiants. Contrairement aux modèles de médiation traditionnels qui examinent séparément chaque canal de transmission, les SEM permettent d'estimer de manière conjointe l'ensemble des relations causales reliant la variable de traitement, les médiateurs et les résultats académiques. Cette approche offre ainsi une vision plus intégrée des processus sous-jacents à l'impact de l'IA.
L'hypothèse centrale est que l'intelligence artificielle n'améliore pas directement les performances des étudiants, mais agit à travers plusieurs mécanismes intermédiaires. L'adoption de solutions fondées sur l'IA peut notamment favoriser une personnalisation accrue des apprentissages, améliorer la qualité et la rapidité des feedbacks pédagogiques, réduire certaines charges de travail des enseignants et faciliter l'accès à des ressources éducatives diversifiées. Ces différents canaux sont susceptibles d'interagir entre eux et de produire des effets complémentaires sur la réussite académique. Les modèles d'équations structurelles permettent précisément de prendre en compte ces interdépendances et d'évaluer la contribution relative de chacun des mécanismes identifiés.
De manière générale, le modèle structurel peut être représenté par un système d'équations reliant l'utilisation de l'IA aux différents médiateurs, puis les médiateurs aux résultats académiques :

$$M_{k,ict}=\alpha_k+\delta_k IA_{ict}+X'_{ict}\gamma_k+\mu_c+\lambda_t+\varepsilon_{k,ict}$$

pour chaque mécanisme de transmission k, et :

$$Y_{ict} = \alpha + \beta IA_{ict} + \sum_{k=1}^{K} \theta_k M_{k,ict} + X'_{ict}\gamma + \mu_c + \lambda_t + \varepsilon_{ict}$$

où $M_{k,ict}$ représente les différentes variables médiatrices, Y_{ict} la mesure de performance académique, IA_{ict} l'intensité d'utilisation de l'intelligence artificielle, X_{ict} l'ensemble des variables de contrôle, et μ_c et λ_t les effets fixes associés respectivement aux centres et aux périodes d'observation.

Cette spécification permet de décomposer l'effet total de l'IA en un effet direct, capturé par le coefficient β, et un ensemble d'effets indirects transitant par les différents médiateurs. L'effet indirect associé à un canal donné correspond au produit du coefficient mesurant l'impact de l'IA sur ce médiateur (δ_k) et du coefficient reliant ce médiateur à la performance académique (θk). La somme de ces effets indirects fournit une mesure de la contribution globale des mécanismes de transmission à l'effet observé de l'intelligence artificielle.

Par ailleurs, les modèles d'équations structurelles offrent la possibilité d'introduire des variables latentes représentant des concepts difficilement observables directement, tels que la qualité du soutien pédagogique, l'engagement des étudiants ou le degré d'intégration effective de l'IA dans les pratiques d'enseignement. Ces constructions latentes peuvent être mesurées à partir de plusieurs indicateurs observés, ce qui améliore la validité des estimations et réduit les erreurs de mesure susceptibles d'affecter les résultats.

L'utilisation des SEM constitue ainsi un complément naturel aux analyses de médiation présentées précédemment. Alors que les modèles de médiation permettent d'identifier séparément les principaux canaux de transmission, les équations structurelles offrent un cadre unifié permettant d'estimer simultanément les relations entre l'ensemble des variables du modèle. Cette approche contribue à une compréhension plus fine des mécanismes par lesquels l'intelligence artificielle influence la réussite académique en CPGE et permet d'identifier les leviers pédagogiques les plus susceptibles de maximiser les bénéfices de son intégration dans l'enseignement.

4.6. Validation empirique et analyses de robustesse

La crédibilité des résultats obtenus repose non seulement sur la qualité de la stratégie d'identification retenue, mais également sur la vérification rigoureuse des hypothèses sous-jacentes aux différents modèles estimés. Dans les études portant sur l'impact de politiques éducatives ou d'innovations technologiques, les estimations peuvent être affectées par des biais liés à des tendances préexistantes, à des erreurs de spécification ou à des problèmes d'inférence statistique. Il est donc indispensable de soumettre les résultats à une série de tests complémentaires permettant d'évaluer leur validité interne et leur robustesse.

Cette dernière étape de l'analyse empirique vise ainsi à vérifier la pertinence des hypothèses d'identification, à tester la sensibilité des résultats à différentes spécifications économétriques, à valider les instruments mobilisés dans les estimations par variables instrumentales et à garantir la fiabilité des procédures d'inférence statistique. L'objectif est de s'assurer que les effets attribués à l'adoption de l'intelligence artificielle dans les CPGE ne résultent pas d'artefacts méthodologiques ou de choix de modélisation particuliers.

4.6.1. Vérification des hypothèses d'identification

La validité des estimations causales repose sur plusieurs hypothèses qui doivent être vérifiées empiriquement afin de limiter les risques de biais d'interprétation. Dans le cadre des modèles différences-en-différences et des approches dynamiques retenues dans cette étude, une attention particulière est accordée à l'analyse des tendances préalables au traitement et à l'identification d'éventuels effets anticipés.

La première vérification concerne l'**hypothèse de pré-tendances parallèles**. Cette condition essentielle exige que les groupes traités et non traités présentent des trajectoires similaires avant l'introduction des outils d'intelligence artificielle. Des tests spécifiques sont réalisés en estimant les coefficients associés aux périodes précédant le traitement. L'absence de coefficients statistiquement significatifs avant l'adoption de l'IA constitue un argument favorable à la validité de l'hypothèse d'évolution parallèle.

Une deuxième série d'analyses repose sur des modèles de type **event study** permettant d'examiner la dynamique temporelle des effets du traitement. Cette approche consiste à estimer séparément l'impact de l'IA pour chaque période précédant et suivant son introduction. Les représentations graphiques associées permettent de visualiser simultanément l'absence d'effets anticipés et l'évolution progressive des effets après l'adoption. Elles offrent également une meilleure compréhension de la vitesse d'apparition des bénéfices potentiels associés à l'utilisation de l'intelligence artificielle.

Enfin, des **tests de placebo** sont mis en œuvre afin de vérifier que les effets estimés ne résultent pas d'un phénomène non observé ou d'une corrélation fortuite. Ces tests consistent à attribuer artificiellement un traitement à des périodes antérieures à la diffusion effective de l'IA ou à des matières supposées faiblement exposées à son utilisation. L'obtention de coefficients non significatifs dans ces configurations renforce la crédibilité de l'interprétation causale des résultats principaux.

4.6.2. Robustesse des spécifications

Afin de vérifier que les conclusions obtenues ne dépendent pas d'une forme fonctionnelle particulière, plusieurs spécifications alternatives sont estimées. Cette démarche permet d'évaluer la stabilité des coefficients associés à l'utilisation de l'intelligence artificielle lorsque la définition des variables ou la structure du modèle sont modifiées.

Une première série de tests repose sur l'utilisation de **transformations logarithmiques** des variables quantitatives lorsque leur distribution présente une forte asymétrie. Cette transformation permet de réduire l'influence des valeurs extrêmes et d'interpréter les coefficients en termes relatifs plutôt qu'absolus. La comparaison des résultats avec ceux obtenus à partir des variables en niveau permet d'évaluer la sensibilité des estimations à la représentation choisie des données.

Une seconde vérification consiste à standardiser certaines variables sous la forme de **z-scores**. Cette transformation ramène les variables à une moyenne nulle et à un écart-type égal à un, facilitant ainsi la comparaison des effets estimés entre différentes mesures de performance ou différentes dimensions de l'adoption de l'IA. La stabilité des résultats après standardisation constitue un indicateur important de robustesse.

Enfin, lorsque la variable dépendante correspond à un comptage ou à une fréquence d'occurrence, des **modèles de Poisson** sont estimés en complément des modèles linéaires traditionnels. Cette approche permet de vérifier que les conclusions ne dépendent pas des hypothèses associées aux moindres carrés ordinaires et demeure adaptée à certaines distributions non gaussiennes fréquemment observées dans les données éducatives.

La convergence des résultats obtenus à travers ces différentes spécifications constitue une preuve supplémentaire de la robustesse des effets estimés.

4.6.3. Validation des instruments

Dans les estimations mobilisant une stratégie par variables instrumentales, la qualité des instruments utilisés conditionne directement la validité des résultats. Trois séries de vérifications sont donc mises en œuvre afin d'évaluer leur pertinence et leur exogénéité.

La première concerne la **statistique F de première étape**, qui permet de mesurer la force de la relation entre l'instrument et la variable d'adoption de l'intelligence artificielle. Conformément à la littérature économétrique, une valeur suffisamment élevée de cette statistique réduit le risque de biais liés à la présence d'instruments faibles et garantit la qualité de l'identification.

La deuxième vérification repose sur le **test de Hansen de sur-identification**, appliqué lorsque plusieurs instruments sont disponibles. Ce test examine la cohérence globale des instruments en vérifiant qu'ils ne sont pas corrélés avec le terme d'erreur de l'équation structurelle. L'absence de rejet de l'hypothèse nulle constitue un argument en faveur de leur validité.

Enfin, une réflexion approfondie est consacrée au respect des **restrictions d'exclusion**, selon lesquelles les instruments ne doivent affecter les performances académiques qu'à travers leur

influence sur l'adoption de l'intelligence artificielle. Cette condition est évaluée à la fois sur la base d'arguments théoriques, institutionnels et empiriques. Des analyses complémentaires sont menées pour exclure l'existence de canaux alternatifs susceptibles de relier directement les instruments aux résultats scolaires.

L'ensemble de ces vérifications permet de garantir que les estimations par variables instrumentales identifient effectivement un effet causal de l'IA et non une relation biaisée par des facteurs non observés.

4.6.4. Robustesse de l'inférence statistique

La précision des estimations dépend également de la qualité des procédures d'inférence utilisées. Dans les données éducatives, les observations sont souvent regroupées au sein de classes, de centres ou d'établissements, ce qui peut générer une corrélation intra-groupe des erreurs et conduire à une sous-estimation des erreurs standards classiques.

Pour tenir compte de cette dépendance potentielle, l'ensemble des estimations principales est réalisé avec des **erreurs standards clusterisées** au niveau approprié de regroupement, généralement celui du centre CPGE ou de la classe lorsque l'information est disponible. Cette correction permet d'obtenir des intervalles de confiance plus fiables et des tests statistiques mieux adaptés à la structure des données.

Par ailleurs, lorsque le nombre de groupes est relativement limité, les méthodes d'inférence conventionnelles peuvent demeurer insuffisantes. Afin de renforcer la fiabilité des résultats, des procédures de **wild cluster bootstrap** sont également mises en œuvre. Cette méthode génère empiriquement la distribution d'échantillonnage des estimateurs à partir de multiples rééchantillonnages respectant la structure des clusters observés. Elle fournit des valeurs critiques et des niveaux de significativité plus robustes dans les contextes où les méthodes asymptotiques traditionnelles peuvent être imprécises.

La combinaison des erreurs standards clusterisées et des procédures de bootstrap constitue ainsi une garantie supplémentaire quant à la solidité des conclusions statistiques de l'étude. Les résultats ne seront considérés comme pleinement robustes que lorsqu'ils demeureront stables à travers l'ensemble de ces méthodes d'inférence, confirmant ainsi la fiabilité de l'effet estimé de l'intelligence artificielle sur la performance académique des étudiants en CPGE.

4.7. Interprétation et présentation des résultats

Une fois les différentes estimations réalisées et les hypothèses d'identification validées, l'étape finale consiste à interpréter les résultats obtenus de manière cohérente et à les présenter sous une forme permettant d'évaluer à la fois leur signification statistique et leur portée économique. L'objectif n'est pas seulement de déterminer si l'intelligence artificielle exerce un effet significatif sur les performances académiques des étudiants en CPGE, mais également de comprendre l'ampleur de cet effet, sa dynamique dans le temps, son hétérogénéité selon les populations concernées ainsi que les mécanismes qui le sous-tendent.

La présentation des résultats s'appuie sur des tableaux synthétiques regroupant les principales estimations économétriques, complétés par des représentations graphiques permettant de visualiser les effets dynamiques et les différences entre groupes. Une attention particulière est accordée à l'interprétation économique des coefficients afin de traduire les résultats statistiques en implications concrètes pour les étudiants, les enseignants et les décideurs éducatifs.

4.7.1. Interprétation des effets moyens

L'analyse des effets moyens repose principalement sur l'interprétation des coefficients estimés dans les différents modèles économétriques. Trois paramètres jouent un rôle central dans cette étude : le coefficient moyen du traitement (β), les paramètres associés aux mécanismes de transmission (θ) et l'estimateur obtenu par variables instrumentales (β^{IV}).

Le coefficient β mesure l'effet moyen de l'utilisation de l'intelligence artificielle sur la performance académique des étudiants, toutes choses égales par ailleurs. Selon la variable dépendante retenue,

ce coefficient peut être interprété comme une variation moyenne de la note obtenue, une modification de la probabilité d'admissibilité à un concours ou encore une amélioration du classement relatif des étudiants. Lorsque les variables sont standardisées, l'effet est exprimé en nombre d'écarts-types, facilitant ainsi les comparaisons entre différentes mesures de performance.
Une attention particulière est portée à la distinction entre signification statistique et signification économique. Un coefficient statistiquement significatif mais de faible ampleur peut avoir une importance pratique limitée, tandis qu'un effet économiquement substantiel peut justifier la mise en œuvre de politiques publiques favorisant l'intégration de l'IA dans les établissements. Les résultats sont donc systématiquement interprétés en unités concrètes et rapportés à la dispersion observée des performances académiques.
Les coefficients θ, estimés dans les modèles de médiation et dans les équations structurelles, permettent d'évaluer l'influence des différents mécanismes intermédiaires sur les résultats académiques. Ils renseignent sur la contribution respective des variables de médiation telles que la personnalisation des apprentissages, le feedback pédagogique, la réduction de la charge enseignante ou l'accès aux ressources numériques. Une valeur élevée de θ indique que le mécanisme considéré constitue un levier important dans la transmission de l'effet de l'intelligence artificielle.
Enfin, le coefficient β^{IV}, obtenu à partir des modèles à variables instrumentales, fournit une estimation de l'effet causal de l'IA corrigée des éventuels biais d'endogénéité. La comparaison entre β et β^{IV} permet d'évaluer l'existence potentielle de biais de sélection ou d'autosélection dans l'adoption de l'intelligence artificielle. Un écart important entre ces deux estimations peut révéler que les établissements ou les étudiants adoptant l'IA sont initialement différents des autres sur des caractéristiques non observées. À l'inverse, des résultats similaires renforcent la crédibilité des estimations principales.

4.7.2. Analyse des effets dynamiques

Au-delà des effets moyens, il est important d'étudier l'évolution temporelle de l'impact de l'intelligence artificielle afin de déterminer si ses effets apparaissent immédiatement après son adoption ou s'ils se construisent progressivement.
Cette analyse repose sur les estimations de type *event study*, qui permettent de mesurer l'effet du traitement à différentes périodes avant et après l'introduction de l'IA. Les résultats sont présentés sous forme graphique, avec les coefficients estimés et leurs intervalles de confiance pour chaque période relative à l'adoption.
Ces graphiques remplissent plusieurs fonctions. Premièrement, ils permettent de vérifier visuellement l'absence de pré-tendances significatives avant le traitement, condition essentielle à la validité de l'identification causale. Deuxièmement, ils renseignent sur la vitesse d'apparition des effets. Les bénéfices de l'IA peuvent par exemple être faibles au cours des premiers mois d'utilisation avant de s'amplifier lorsque les étudiants et les enseignants développent une meilleure maîtrise des outils disponibles.
L'analyse dynamique permet également d'identifier l'existence éventuelle de phénomènes d'apprentissage, d'adaptation ou de saturation. Une augmentation progressive des coefficients post-traitement suggérerait une accumulation des bénéfices dans le temps, tandis qu'une diminution de l'effet pourrait révéler un essoufflement ou une utilisation moins intensive des outils d'IA après leur phase initiale d'adoption.

4.7.3. Analyse des hétérogénéités

L'estimation d'un effet moyen peut masquer des différences importantes entre filières, établissements ou catégories d'étudiants. Pour cette raison, l'étude accorde une place particulière à l'analyse des effets hétérogènes.
Une première source d'hétérogénéité concerne les différentes **filières de CPGE**. Les effets de l'IA peuvent varier selon les spécificités pédagogiques des filières scientifiques ou économiques. Certaines disciplines se prêtent davantage à l'automatisation des exercices, aux outils de résolution

assistée ou aux systèmes de tutorat intelligents. Les résultats sont donc estimés séparément pour chaque filière afin d'identifier les contextes dans lesquels l'intégration de l'IA est la plus efficace.
Une seconde dimension concerne les caractéristiques individuelles des étudiants. Des estimations spécifiques sont réalisées selon le genre, le statut boursier, l'origine géographique, le niveau académique initial ou encore le niveau de maîtrise des outils numériques. Cette analyse permet de déterminer si certains groupes bénéficient davantage de l'intelligence artificielle que d'autres.
Les modèles incluent également des termes d'interaction entre l'adoption de l'IA et différentes caractéristiques individuelles ou institutionnelles. Ces coefficients d'interaction permettent de mesurer directement les écarts d'impact entre groupes et d'identifier les facteurs associés à une plus forte efficacité de la technologie.

4.7.4. Analyse des mécanismes de transmission

L'interprétation des résultats ne se limite pas à l'identification d'un effet global. Elle vise également à comprendre comment cet effet se construit à travers différents mécanismes intermédiaires.
Les modèles de médiation permettent de distinguer l'effet direct de l'intelligence artificielle de ses effets indirects transitant par les variables médiatrices identifiées précédemment. Pour chaque canal, l'effet médié est obtenu en combinant l'impact de l'IA sur le médiateur et l'impact de ce médiateur sur la performance académique.
Une décomposition des effets est alors réalisée afin d'estimer la contribution relative de chacun des mécanismes étudiés. Cette démarche permet de répondre à plusieurs questions essentielles : l'amélioration des résultats est-elle principalement liée à une personnalisation accrue des apprentissages ? Résulte-t-elle surtout de la qualité du feedback pédagogique ? Les gains observés proviennent-ils davantage de la réorganisation du temps enseignant ou d'un meilleur accès aux ressources éducatives ?
Les résultats sont présentés à travers des tableaux de décomposition et, lorsque cela est pertinent, au moyen de schémas synthétiques issus des modèles d'équations structurelles. Cette présentation facilite l'identification des principaux leviers par lesquels l'intelligence artificielle influence les performances académiques.

4.7.5. Analyse des effets sur l'équité

Au-delà de son impact moyen sur la réussite académique, l'intelligence artificielle peut également modifier la distribution des performances entre les différentes catégories d'étudiants. L'étude examine donc explicitement les conséquences de son adoption sur les inégalités éducatives.
Une première analyse porte sur l'**évolution des écarts de performance** entre groupes socio-économiques, entre étudiants boursiers et non boursiers, entre hommes et femmes, ainsi qu'entre étudiants issus de contextes urbains et ruraux. L'objectif est de déterminer si l'IA contribue à réduire ou, au contraire, à accentuer les disparités préexistantes.
Une attention particulière est accordée aux coefficients d'interaction entre l'utilisation de l'IA et les caractéristiques individuelles. Des interactions statistiquement significatives indiquent que les bénéfices de l'IA ne sont pas uniformément répartis dans la population étudiée. Ces résultats permettent d'identifier les catégories d'étudiants qui profitent le plus de ces technologies ainsi que celles qui pourraient nécessiter des dispositifs d'accompagnement complémentaires.
L'interprétation des résultats en matière d'équité constitue un enjeu majeur pour les politiques éducatives. Si l'intelligence artificielle améliore davantage les performances des étudiants déjà favorisés, elle risque d'accroître les inégalités existantes. À l'inverse, si elle bénéficie prioritairement aux étudiants rencontrant des difficultés d'apprentissage ou disposant de moins de ressources éducatives, elle peut devenir un puissant levier de réduction des inégalités scolaires.
Au terme de cette analyse, l'interprétation conjointe des effets moyens, des dynamiques temporelles, des hétérogénéités, des mécanismes de transmission et des enjeux d'équité permet de proposer une évaluation complète de l'impact de l'intelligence artificielle dans les CPGE. Cette approche multidimensionnelle offre non seulement une mesure rigoureuse de l'efficacité de ces technologies,

mais également une compréhension approfondie des conditions dans lesquelles leur intégration peut contribuer à améliorer durablement la réussite académique des étudiants.

V. Résultats attendus

Cette section présente les résultats que le cadre théorique et la littérature permettent d'anticiper. Il ne s'agit pas de résultats empiriques, mais de prédictions testables, formulées sous forme d'hypothèses opérationnelles.

5.1. Effets moyens attendus

Le modèle à effets fixes devrait faire apparaître un coefficient β positif et statistiquement significatif : une hausse de l'indice d'adoption de l'IA, au sein d'un même centre-filière, serait associée à une amélioration des notes standardisées, de la progression semestrielle et des probabilités d'admissibilité et d'admission aux concours.

L'estimateur par variables instrumentales (β^{IV}) devrait rester positif. Sa comparaison avec β est instructive : si β^{IV} est inférieur à β, cela suggère que l'estimation initiale est biaisée à la hausse par la sélection des établissements les mieux dotés, qui adoptent l'IA plus tôt et performent déjà mieux. Si β^{IV} est supérieur, l'adoption pourrait être plus fréquente dans des centres en difficulté cherchant à rattraper leur retard, ce qui biaiserait β à la baisse. On rappelle aussi que β^{IV} est un effet local, propre aux unités dont l'adoption répond aux instruments (calendrier de formation des AREF, déploiement des infrastructures).

On anticipe enfin un effet modéré en ampleur. Dans un environnement déjà très sélectif et intensif comme les CPGE, la marge de progression est plus étroite que dans l'enseignement ordinaire, et un effet de quelques dixièmes d'écart-type serait déjà économiquement significatif.

5.2. Effets dynamiques attendus

L'analyse en event study devrait montrer des coefficients pré-traitement proches de zéro (validant l'hypothèse de tendances parallèles), puis des coefficients post-traitement faibles les premières périodes et croissants ensuite. Ce profil traduirait une phase d'appropriation par les enseignants et les étudiants, caractéristique de l'adoption d'une technologie éducative. Une stabilisation, voire un léger tassement à long terme, est également plausible (effet de saturation ou usages moins intensifs après la période de nouveauté).

5.3. Hétérogénéités attendues

Tableau n° 7 : Résultats attendus

Dimension	Résultat attendu	Justification
Filières	Effets plus marqués en filières scientifiques et technologiques (MP, PC, PSI, TSI)	Exercices structurés, outils de résolution assistée et de correction automatisée plus développés
Niveau initial (quantiles)	Gains plus élevés dans les quantiles inférieurs *ou* supérieurs selon le type d'usage	Un usage de rattrapage et de tutorat favorise les profils fragiles, un usage autonome et exploratoire favorise les profils forts
Statut boursier	Interaction ambiguë	Dépend de l'accès réel aux outils et de la compétence numérique
Origine géographique	Effets plus faibles hors des grands centres urbains	Connectivité et infrastructures inégales
Genre	Pas d'effet différencié majeur anticipé	À tester, la littérature étant peu concluante

Source : Auteurs

5.4. Mécanismes attendus

L'effet total devrait transiter principalement par la personnalisation des apprentissages et le feedback pédagogique, canaux les plus directement liés à l'apprentissage de l'étudiant. La réduction de la charge enseignante devrait avoir un effet indirect plus modeste, conditionné à la réallocation effective du temps libéré vers l'accompagnement individuel. L'accès aux ressources devrait jouer un rôle important pour les étudiants disposant de moins de ressources complémentaires (cours particuliers, annales commentées). Une part de l'effet devrait rester non médiée (effet direct β), signalant des canaux non mesurés.

5.5. Effets sur l'équité

Deux scénarios sont envisageables :

- **Scénario de convergence** : si l'accès aux outils et la formation sont généralisés, l'IA joue un rôle de compensation (tutorat, feedback, ressources) et les gains sont plus élevés chez les étudiants les plus fragiles. Les écarts entre boursiers et non-boursiers, entre zones urbaines et rurales, se réduisent.
- **Scénario de divergence** : si l'accès, la connectivité ou la maîtrise des outils sont inégaux, les étudiants et établissements déjà favorisés captent l'essentiel des gains, ce qui accentue les écarts (effet de type « Matthew »).

L'issue dépendra donc moins de la technologie elle-même que des conditions de son déploiement, ce qui justifie le volet de recommandations.

VI. Discussion critique

6.1. Contributions théoriques

Cet article propose un cadre intégré reliant technologie éducative, performance académique et équité, adapté aux CPGE marocaines, terrain peu étudié mais stratégique. Il dépasse la vision binaire « utilise / n'utilise pas l'IA » en introduisant un indice multidimensionnel (usages enseignants, usages étudiants, infrastructures, gouvernance). Il articule aussi mesure causale des effets et compréhension des mécanismes, en conciliant les apports positivistes et constructivistes.

6.2. Contributions méthodologiques

La combinaison des effets fixes, du DiD avec event study, des variables instrumentales, des régressions quantiles et des modèles de médiation répond à des limites différentes : hétérogénéité inobservée, adoption échelonnée, endogénéité, effets distributionnels et mécanismes. Le dispositif de robustesse (placebo, clustering, wild cluster bootstrap) est particulièrement adapté à un nombre limité de centres (29 centres publics), où l'inférence asymptotique usuelle serait fragile.

6.3. Limites de la recherche

- Caractère théorique : aucune estimation n'est réalisée, les résultats restent des attentes.
- Absence de base nationale : les sources envisagées (administratives, AREF, concours) devront être négociées et harmonisées.
- Mesure de l'usage réel de l'IA : l'indice repose en partie sur des déclarations et peut mal capter les usages informels des étudiants, très répandus avec l'IA générative.
- Nombre limité de clusters : un faible nombre de centres réduit la puissance statistique.
- Validité des instruments : la condition d'exclusion est difficile à garantir (par exemple, la fibre optique peut affecter les résultats par d'autres canaux que l'IA).
- Effets de diffusion : des enseignants circulant entre centres ou des étudiants échangeant des outils peuvent contaminer le groupe de contrôle (violation de la SUTVA).
- Évolution rapide de l'IA générative : l'adoption se généralise vite, ce qui peut réduire la taille du groupe « non traité » et brouiller la frontière traité/contrôle.
- Validité externe : les résultats ne seraient pas transposables tels quels à l'enseignement supérieur de masse.

6.4. Perspectives de recherche

Les prolongements possibles sont la constitution d'une base de données nationale des CPGE, des enquêtes longitudinales auprès des étudiants et enseignants, des comparaisons internationales (France, Maghreb), l'évaluation de l'IA générative sur les résultats aux concours et des expérimentations contrôlées (essais randomisés par classe ou par centre) pour consolider l'identification causale.

VII. Recommandations

7.1. Formation des enseignants

Mettre en place des programmes de formation continue, organisés avec les AREF, couvrant l'usage pédagogique de l'IA, l'évaluation des productions assistées par IA et l'esprit critique face aux sorties des modèles. La formation conditionne la réallocation du temps enseignant libéré vers l'accompagnement individualisé.

7.2. Généralisation des infrastructures numériques

Garantir à tous les centres, y compris hors des grandes villes, une connectivité fiable, un équipement suffisant et l'accès aux plateformes. Sans cela, l'adoption restera déterminée par les ressources locales.

7.3. Développement d'une stratégie IA pour les CPGE

Définir, sous l'égide du Ministère, un cadre national : objectifs pédagogiques, outils recommandés, intégration au programme Classe Numérique Genie, indicateurs de suivi et mécanisme d'évaluation. Un déploiement échelonné et documenté faciliterait l'évaluation d'impact (DiD, event study).

7.4. Réduction des inégalités numériques

Cibler les étudiants boursiers et ceux issus de zones rurales : accès aux équipements et aux licences, ateliers d'initiation, accompagnement par les enseignants. Suivre régulièrement les écarts de performance entre groupes pour détecter tôt un éventuel effet de divergence.

7.5. Encadrement éthique des usages

Élaborer des chartes d'usage clarifiant ce qui est permis en devoirs, khôlles et concours blancs, protéger les données des étudiants, exiger la transparence des outils utilisés et préserver l'intégrité des évaluations, la valeur des concours reposant sur leur équité.

VIII. Conclusion générale

Cet article avait pour objectif de proposer un cadre théorique et méthodologique d'analyse de l'impact de l'intelligence artificielle sur les performances académiques dans les CPGE marocaines. En mobilisant une approche économétrique combinant modèles de panel à effets fixes, différences-en-différences, variables instrumentales, régressions quantiles et modèles de médiation, l'étude propose une stratégie robuste d'identification susceptible d'être mise en œuvre dans de futurs travaux empiriques. Le modèle suggère que l'intelligence artificielle pourrait constituer un levier d'amélioration de la performance académique, notamment à travers la personnalisation des apprentissages, l'amélioration du feedback pédagogique et l'élargissement de l'accès aux ressources éducatives. Toutefois, ses effets sur l'équité demeurent conditionnés par les modalités d'accès, de formation et d'accompagnement des acteurs éducatifs.

Les résultats attendus appellent toutefois à la prudence : les gains potentiels de l'IA ne sont ni automatiques ni uniformes, et dépendent de la formation des enseignants, de la qualité des infrastructures et du cadre éthique entourant les usages.

En proposant un cadre conceptuel adapté au contexte marocain, cette recherche ouvre la voie à de futures évaluations empiriques destinées à mesurer l'impact réel de l'intelligence artificielle sur l'enseignement préparatoire et à orienter les politiques publiques de transformation numérique de l'éducation.

Bibliographie

Références académiques

- Angrist, J. D., & Pischke, J. S. (2009). *Mostly harmless econometrics: An empiricist's companion*. Princeton University Press.
- Boden, M. A. (2018). *Artificial intelligence: A very short introduction*. Oxford University Press.
- Brahmi, H., Belouali, S., Demazeau, Y., Bouchentouf, T., & Alaoui, N. H. (2023). Vers un référentiel universel pour un usage éthique de l'intelligence artificielle. *East African Journal of Information Technology, 6*(1), 91-106.
- Collin, S., Lepage, A., & Nebel, L. (2023). Enjeux éthiques et critiques de l'intelligence artificielle en éducation : une revue systématique de la littérature. *Canadian Journal of Learning and Technology, 49*(4), 1-29.
- Cunningham, S. (2021). *Causal inference: The mixtape*. Yale University Press.
- Georges, B. (2019). Intelligence artificielle : de quoi parle-t-on ? *Constructif, 54*, 5-10.
- Gil de Zúñiga, H., Goyanes, M., & Durotoye, T. (2023). A scholarly definition of artificial intelligence (AI). *Political Communication*.
- Hanushek, E. A., & Woessmann, L. (2020). *The knowledge capital of nations: Education and the economics of growth*. MIT Press.
- Imbens, G. W., & Rubin, D. B. (2015). *Causal inference for statistics, social, and biomedical sciences: An introduction*. Cambridge University Press.
- Jenfi, Y., & Zitouni, A. (2024). L'intelligence artificielle au service de l'éducation au Maroc : opportunités, défis et perspectives. *Revue Internationale de Gestion et d'Économie Appliquée, 2*(9), 1-15.
- Messaoudi, A. (2024). Les défis de l'IA dans l'éducation : de la protection des données aux biais algorithmiques. *Médiations & Médiatisations, 18*, 148-160.
- Miao, F., & Holmes, W. (2021). *AI and education: Guidance for policy-makers*. UNESCO.
- Moussavou, J. (2023). ChatGPT dans la rédaction scientifique : des perspectives prometteuses, des préoccupations légitimes. *Management & Datascience*.
- OECD. (2021). *OECD digital education outlook 2021: Pushing the frontiers with artificial intelligence, blockchain and robots*. OECD Publishing.
- Ouoba, N. E. (2024). L'intégration des outils d'intelligence artificielle dans l'enseignement supérieur : perceptions, usages et défis. *Les Cahiers de l'ACAREF, 4*.
- Pallanca, O., & Read, J. (2021). Principes généraux et définitions en intelligence artificielle. *Archives des Maladies du Cœur et des Vaisseaux - Pratique, 294*, 3-10.
- Razouki, H., Cherradi, B., Hair, A., & Razouki, A. (2025). L'impact de l'intelligence artificielle sur l'enseignement et l'apprentissage : enjeux et perspectives. Dans *SHS Web of Conferences* (Vol. 214, Article 01010). EDP Sciences.
- Sheikh, H., Prins, C., & Schrijvers, E. (2023). *Artificial intelligence: Definition and background*. Springer.
- Turing, A. M. (1950). Computing machinery and intelligence. *Mind, 59*(236), 433-460. https://doi.org/10.1093/mind/LIX.236.433
- UNESCO. (2021). *Recommandation sur l'éthique de l'intelligence artificielle*. UNESCO.
- UNESCO. (2023). *Guidance for generative AI in education and research*. UNESCO.
- Vallerand, V., & Hamel, C. (2024). Le développement professionnel des enseignants à et avec l'intelligence artificielle : une revue de littérature. *Médiations & Médiatisations, 18*, 9-42.

Références institutionnelles et réglementaires

- Direction Générale de l'Action Pédagogique. (2024). *Données statistiques nationales relatives aux classes préparatoires aux grandes écoles (CPGE)*. Ministère de l'Éducation nationale, du Préscolaire et des Sports, Maroc.
- Direction Générale de l'Action Pédagogique. (2024). *Rapport de la rentrée scolaire 2024-2025 des classes préparatoires aux grandes écoles*. Ministère de l'Éducation nationale, du Préscolaire et des Sports, Maroc.
- Ministère de l'Éducation nationale, du Préscolaire et des Sports. (2004). *Arrêté ministériel n° 455.02 du 5 juin 2004 relatif à l'organisation des classes préparatoires aux grandes écoles*. Royaume du Maroc.
- Ministère de l'Éducation nationale, du Préscolaire et des Sports. (2004). *Arrêté ministériel n° 456.02 du 5 juin 2004 relatif à la filière Mathématiques et Physique (MP)*. Royaume du Maroc.
- Ministère de l'Éducation nationale, du Préscolaire et des Sports. (2004). *Arrêté ministériel n° 457.02 du 5 juin 2004 relatif à la filière Physique et Chimie (PC)*. Royaume du Maroc.
- Ministère de l'Éducation nationale, du Préscolaire et des Sports. (2004). *Arrêté ministériel n° 458.02 du 5 juin 2004 relatif à la filière Physique et Sciences de l'Ingénieur (PSI)*. Royaume du Maroc.
- Ministère de l'Éducation nationale, du Préscolaire et des Sports. (2004). *Arrêté ministériel n° 460.02 du 5 juin 2004 relatif à la filière Technologie et Sciences Industrielles (TSI)*. Royaume du Maroc.
- Ministère de l'Éducation nationale, du Préscolaire et des Sports. (2004). *Arrêté ministériel n° 462.17 du 26 septembre 2004 relatif à la filière Économie et Commerce, option technologique (ECT)*. Royaume du Maroc.
- Ministère de l'Éducation nationale, du Préscolaire et des Sports. (2004). *Arrêté ministériel n° 463.17 du 26 septembre 2004 relatif à la filière Économie et Commerce, option scientifique (ECS)*. Royaume du Maroc.
- Ministère de l'Éducation nationale, du Préscolaire et des Sports. (2011). *Note cadre relative à l'organisation et à la gestion des classes préparatoires aux grandes écoles*. Royaume du Maroc.
- Ministère de l'Éducation nationale, du Préscolaire et des Sports. (2024). *Lettre ministérielle n° 165X24 du 24 mai 2024 relative à l'accès aux classes préparatoires aux grandes écoles*. Royaume du Maroc.
- Ministère de l'Éducation nationale, du Préscolaire et des Sports. (2024). *Programme GENIE : transformation numérique et innovation pédagogique*. Royaume du Maroc.

Webographie

- Classes Préparatoires aux Grandes Écoles du Maroc. (2025). *Portail officiel des CPGE marocaines*. https://www.cpge.ac.ma
- Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE). (2025). *Artificial intelligence and education*. https://www.oecd.org
- Organisation des Nations unies pour l'éducation, la science et la culture (UNESCO). (2025). *Artificial intelligence in education*. https://www.unesco.org