



Modéliser l'apprentissage : entre cognition humaine, intelligence artificielle et mathématiques

<https://cogmathia2025.sciencesconf.org/>

Actes du colloque

Direction : Imène Ghedamsi & Rahim Kouki

Edition ARDECOST & ATDM

2025





COGMATHIA2025



Résumés des conférences

Conférenciers (par ordre alphabétique)

Benoît Delahaye, Université de Nantes

Fabien Emprin, Université de Reims

Bassem Hamed, Université de Sfax

Guillaume Jouve, Université de Lille

Faten Khaloufi, Université de Carthage



Modélisation et vérification formelles de systèmes complexes

Benoît Delahaye, Université de Nantes, benoit.delahaye@univ-nantes.fr

Le but de cette conférence sera de présenter comment des méthodes formelles telles que le model checking et le model checking statistique peuvent être utilisées en pratique pour étudier des systèmes complexes (hybrides, différentiels) issus de l'environnement.

Dans un premier temps, j'aborderai les principes de la modélisation formelle pour les systèmes complexes, en particulier à l'aide de modèles à états tels que les automates, les chaînes de Markov et les processus de décision Markoviens, en insistant sur la nécessité de prendre en compte la variabilité des systèmes étudiés dès la phase de modélisation. Dans un deuxième temps, je présenterai des techniques formelles de vérification telles que le model checking (statistique), ainsi que des contributions récentes visant à mieux prendre en compte les incertitudes dans la phase de vérification des systèmes étudiés. Finalement, je présenterai deux applications récentes visant à utiliser ces techniques pour étudier des systèmes différentiels et hybrides dans le cadre de l'épidémiologie et de l'écologie forestière.

Mots-clés : model checking, modélisation formelle, chaînes de Markov

Formal modelling and verification of complex systems

The aim of this talk is to present how formal methods such as model checking and statistical model checking can be used in practice for the study of complex (hybrid, differential) systems from the field of environment modelling.

First, I will discuss the principles of formal modelling for complex systems, in particular using state-based models such as automata, Markov chains and Markov decision processes, emphasizing the need to take into account the variability of the systems of interest from the modelling phase onwards. Secondly, I will present formal verification techniques such as (statistical) model checking, as well as recent contributions aimed at better taking into account uncertainties in the verification phase of the systems under study. Finally, I will present two recent applications aimed at using these techniques to study differential and hybrid systems in the context of epidemiology and forest ecology.

Keywords: model checking, formal modelling, Markov chains



IA et didactique des mathématiques : des simulateurs à l'usage des Rag dans la formation des enseignants

Fabien Emprin, Université de Reims, fabien.emprin@univ-reims.fr

Le cœur de notre recherche est l'analyse des pratiques de formation ainsi que des "savoirs" de formation. Nous avons commencé, il y a 15 ans à développer des systèmes experts qui simulent les interactions entre un enseignant et ses élèves ou un formateur et un enseignant. Cette simulation est une première forme d'intelligence artificielle qui permet au formateur de prendre du recul sur leurs pratiques. Ces outils nécessitent l'identification de savoir de formation à implémenter dans les outils. Depuis, l'essor des IAG nous a amenés à nous questionner sur les potentialités des RAG (Retreival Augmented generation) que l'on pourrait traduire par génération à enrichissement contextuel. Nous avons donc conçu un RAG basé sur les connaissances issues de la recherche en didactique des mathématiques que nous utilisons avec 3 objectifs : l'utiliser en formation d'enseignant, l'utiliser pour la recherche sur les savoirs de formation, travailler à l'amélioration du RAG lui-même. Pour la formation des enseignants, nous développons des situations de formation basées sur la comparaison des réponses du RAG, d'un IAG et d'une recherche documentaire classique pour amener les enseignants à réfléchir sur les compétences nécessaires pour enseigner. Dans le contexte de la recherche, nous l'utilisons en appui d'une analyse lexicale pour identifier les connaissances et savoirs de formation.

Le dernier point, concernant l'amélioration du RAG reste en projet.

Mots-clés : Retreival Augmented generation, IA, recherche en didactique des mathématiques

AI and didactic of mathematics: From simulators to the use of RAGs in teacher education

The core of our research lies in the analysis of teacher training practices and the associated professional knowledge. Fifteen years ago, we began developing expert systems that simulate interactions between a teacher and their students, or between a teacher educator and a trainee teacher. These simulations represent an early form of artificial intelligence, enabling teacher educators to reflect critically on their practices. Designing such tools requires the identification and formalization of professional knowledge to be embedded within the systems. More recently, the rise of Generative AI has led us to explore the potential of Retrieval-Augmented Generation (RAG), which we might describe as *contextually enriched generation*. We have developed a RAG system grounded in research-based knowledge from the field of didactic of mathematics. This system is used with three main objectives: to support teacher training, to contribute to research on professional knowledge in education, and to work toward the improvement of the RAG model itself. In the context of teacher training, we design learning scenarios that prompt educators to compare responses generated by the RAG, by a conventional generative AI, and by traditional document-based research. This comparative approach is intended to foster reflection on the competencies required for effective mathematics teaching. From a research perspective, we use the RAG system in combination with lexical analysis techniques to identify relevant professional knowledge and practices. The third objective — improving the RAG model itself — remains a work in progress.

Keywords: Retrieval-Augmented Generation, AI, Recherche en didactique des mathématiques



Des théorèmes d'approximation universelle à l'apprentissage incarné : trajectoires mathématiques et limites cognitives de l'intelligence artificielle

Bassem Hamed, Université de Sfax, bassem.benhamed@enetcom.usf.tn

Cette conférence propose une exploration critique des fondements mathématiques de l'apprentissage automatique et de leurs implications pour notre compréhension de la cognition naturelle et artificielle.

Nous retracerons d'abord l'évolution des cadres théoriques qui sous-tendent l'apprentissage profond, depuis les théorèmes d'approximation universelle jusqu'aux architectures transformers. Nous examinerons comment ces résultats mathématiques – issus de l'analyse fonctionnelle, de l'optimisation et des probabilités – ont façonné notre capacité à modéliser des fonctions complexes, tout en soulignant les écarts entre garanties théoriques et performances empiriques. Nous interrogerons ensuite les limites d'une approche purement fonctionnelle de l'intelligence. En nous appuyant sur les sciences cognitives, nous montrerons que l'apprentissage humain ne se réduit pas à une optimisation sur des distributions de données : l'expérience sensori-motrice, la construction active du sens et les dynamiques temporelles révèlent des dimensions que les modèles actuels peinent à capturer.

Enfin, nous esquisserons des pistes pour rapprocher modélisation mathématique et réalisme cognitif : contraintes architecturales neurobiologiques, biais inductifs cognitifs, et cadres formels pour l'apprentissage continual. Nous discuterons également des implications éthiques de ces choix de modélisation dans les contextes éducatifs et décisionnels.

Mots-clés : apprentissage profond, théorèmes d'approximation, cognition incarnée, modélisation mathématique, neurosciences computationnelles

From universal approximation theorems to embodied learning: Mathematical trajectories and cognitive limits of AI

This conference offers a critical exploration of the mathematical foundations of machine learning and their implications for our understanding of both natural and artificial cognition. We will begin by tracing the evolution of the theoretical frameworks underlying deep learning, from universal approximation theorems to transformer architectures. We will examine how key mathematical results—drawing from functional analysis, optimization theory, and probability—have shaped our ability to model complex functions, while highlighting the gap between theoretical guarantees and empirical performance. We will then question the limits of a purely functional approach to intelligence. Drawing on insights from cognitive science, we argue that human learning cannot be reduced to optimization over data distributions: sensorimotor experience, active sense-making, and temporal dynamics point to dimensions of cognition that current models struggle to capture. Finally, we will outline possible pathways for reconciling mathematical modeling with cognitive realism. These include incorporating neurobiological architectural constraints, cognitive inductive biases, and formal frameworks for continual learning. We will also discuss the ethical implications of these modeling choices, particularly in educational and decision-making contexts.

Keywords: deep learning, approximation theorems, embodied cognition, mathematical modeling, computational neuroscience



Quelles modalités d'évaluation universitaires à l'heure de l'IA ?

Guillaume Jouve, Université de Lille, guillaume.jouve@univ-lille.fr

L'essor rapide des intelligences artificielles génératives transforme en profondeur la manière dont les étudiants produisent et présentent leurs travaux et interroge la pertinence des modes d'évaluation universitaires.

Alors que les étudiants développent une maîtrise croissante de ces outils, la recherche en pédagogie et en sciences de l'éducation s'attache à comprendre comment préserver l'équité, la validité et la fiabilité des dispositifs d'évaluation. Les travaux récents mettent en évidence à la fois des risques (fraude, homogénéisation des productions, opacité des processus) et des opportunités. Cette communication se propose de faire le point sur celles-ci tout en discutant les tensions qui peuvent exister entre intégrité académique, innovation technologique et transformation des pratiques enseignantes.

Mots-clés : évaluation, fiabilité des dispositifs IA

What forms of university assessment in the age of AI?

The rapid rise of generative artificial intelligence is profoundly transforming the ways in which students produce and present their academic work, calling into question the relevance of traditional modes of university assessment. As students become increasingly proficient in using these tools, research in pedagogy and educational sciences seeks to understand how to maintain fairness, validity, and reliability in assessment practices.

Recent studies highlight both the risks—such as academic dishonesty, homogenization of student outputs, and the opacity of generative processes—and the opportunities that these technologies present. This presentation aims to provide an overview of current findings while exploring the tensions between academic integrity, technological innovation, and the evolving practices of teaching and assessment.

Keywords: assessment, reliability, generative AI, academic integrity



Modéliser l'apprentissage : un pont entre intelligence humaine et intelligence artificielle pour repenser l'enseignement des mathématiques

Faten Khalloufi-Mouha⁽¹⁾

⁽¹⁾ Université de Carthage. Faculté des Sciences de Bizerte, 7021, Bizerte. Tunisie
faten.khalloufi@fsb.ucar.tn

Résumé : La conférence explore la modélisation de l'apprentissage comme pont entre l'intelligence humaine (sens, créativité) et l'IA (optimisation de données). Une comparaison des paradigmes révèle des écarts, comme l'incapacité de l'IA à gérer les obstacles cognitifs humains. Elle étudie aussi la collaboration humain-IA générative. Un cas pratique en conception d'évaluation mathématique montre que l'IA peut agir comme partenaire cognitif, stimulant la réflexion des enseignants, qui restent les décideurs centraux. Les enjeux didactiques et éthiques de cette hybridation sont discutés.

Mots-clés : apprentissage, intelligence artificielle, IA générative, apprentissage collaboratif, didactique des mathématiques, cognition augmentée.

Abstract : The conference examines learning modeling as a bridge between human intelligence (meaning, creativity) and AI (data optimization). A comparison of paradigms reveals gaps, such as AI's current inability to handle human cognitive obstacles. It also investigates human-generative AI collaboration. A practical case in designing mathematics assessments shows that AI can act as a cognitive partner, stimulating teacher reflection, while teachers remain the central epistemic decision-makers. The didactic and ethical challenges of this hybridization are discussed.

Keywords: learning, artificial intelligence, generative AI, collaborative learning, mathematics didactics, augmented cognition.

1. Introduction et problématique

Les avancées en intelligence artificielle générative, marquées par leur capacité à produire des contenus plausibles, suscitent à la fois fascination et méfiance dans le champ éducatif, en particulier en mathématiques (Khalloufi-Mouha, 2024). Ces systèmes, fondés sur des corrélations statistiques issues de données massives, créent une illusion d'intelligence qui contraste avec la nature profondément incarnée, sociale et constructiviste de l'apprentissage humain (Ji et al. 2023). Leur intégration naïve dans l'éducation pose donc un défi épistémologique et didactique majeur. Cette conférence présente la modélisation de l'apprentissage comme cadre analytique pour mettre en dialogue l'IA et la cognition humaine. Elle explore la question de recherche suivante : *Comment les modèles d'IA peuvent-ils contribuer à l'analyse des processus d'apprentissage mathématique, et comment leur intégration raisonnée peut-elle enrichir le développement du raisonnement, de la créativité et de la pensée critique?*

2. Cadre Historique et Épistémologique : Deux Paradigmes pour Deux Intelligences

Une analyse historique révèle la dualité structurante de l'IA entre l'approche symbolique (manipulation de règles, raisonnement formel) et l'approche connexionniste/data-driven (apprentissage à partir de données). La première reflète une vision rationaliste et computationnelle de l'intelligence, proche de certaines conceptions cognitivistes de



l'apprentissage. La seconde, illustrée par l'essor du deep learning et des modèles génératifs (Rumelhart et al., 1986), privilégie l'adaptation statistique mais échoue à modéliser la compréhension conceptuelle, la preuve ou la construction de sens.

Cet écart fondamental est crucial pour les mathématiques. Alors que l'apprentissage humain mobilise l'erreur, le conflit cognitif et l'interaction sociale comme leviers, l'apprentissage machine actuel est essentiellement corrélational, générant des "hallucinations" et des incohérences qui révèlent son absence de compréhension (Ji et al, 2023). Cette tension historique définit le paysage dans lequel s'inscrivent les applications éducatives.

3. IA en Éducation Mathématique : Une Correspondance avec les Théories de l'Apprentissage

L'évolution des applications de l'IA en éducation mathématique peut être lue à l'aune des grandes théories de l'apprentissage, révélant des affinités et des limites.

Apprentissage supervisé et Cognitivisme : Les Systèmes Tutors Intelligents (ITS) incarnent ce paradigme (Newell & Simon, 1972). S'appuyant sur un modèle expert du domaine (connaissances mathématiques structurées) et un modèle de l'élève (détection de buggy knowledge (Sleeman & Brown, 1982)), ils fournissent un guidage pas-à-pas et une rétroaction adaptée. Ils traduisent une vision cognitiviste où l'apprentissage est un traitement de l'information et une réorganisation de structures mentales.

Apprentissage par renforcement et Béhaviorisme : Ce paradigme sous-tend les plateformes d'exercices adaptatifs. En ajustant dynamiquement la difficulté et en fournissant un feedback immédiat (récompense/correction), le système vise à renforcer les comportements corrects et à maintenir l'engagement. Efficace pour la consolidation procédurale, il peine cependant à soutenir la compréhension conceptuelle ou la métacognition.

Apprentissage non supervisé et Constructivisme : Les méthodes de Learning Analytics et d'Educational Data Mining (Siemens & Baker, 2012) illustrent cette approche. En analysant les traces d'apprentissage (séquences d'erreurs, temps de résolution), elles identifient des profils ou des trajectoires d'apprentissage sans modèle expert préétabli. Cette découverte de régularités évoque la construction active de connaissances, mais risque de réduire l'apprentissage à des corrélations comportementales peu interprétables.

IA Générative et Socioconstructivisme : Les modèles de langage (LLMs) représentent une hybridation technique (combinant pré-entraînement non supervisé, fine-tuning supervisé et apprentissage par renforcement). Leur capacité à générer des explications alternatives, des exercices contextuels ou à modérer des discussions en fait **des médiateurs cognitifs potentiels**. Ils ouvrent la voie à un apprentissage collaboratif humain-IA, où le système agit comme un partenaire dans la co-construction du savoir, s'inscrivant ainsi dans une perspective socioconstructiviste.

4. Vers un Partenariat Critique : Enjeux et Perspectives

La conférence met en lumière un mouvement historique vers l'hybridation des paradigmes d'IA et leur alignement progressif avec des théories de l'apprentissage plus complexes (du béhaviorisme au socioconstructivisme). Cependant, les écarts restent profonds : l'IA ne vit pas les obstacles cognitifs, ne comprend pas le sens des concepts mathématiques, et son "raisonnement" est une simulation statistique.



L'intégration pertinente de l'IA en éducation mathématique repose donc sur un partenariat critique et raisonné, où l'humain conserve son rôle central de décideur épistémique. L'enseignant doit orchestrer l'interaction, évaluer la pertinence des productions de l'IA et guider les apprenants dans une lecture distanciée de ces outils. L'IA générative, utilisée de manière réfléchie, peut alors devenir un catalyseur pour la créativité pédagogique, la différenciation et le développement de la pensée critique des élèves.

Les défis à adresser sont majeurs : formation des enseignants à une littératie algorithmique, conception d'interfaces pédagogiquement robustes, et développement de cadres éthiques pour prévenir les biais et préserver l'autonomie intellectuelle (Khaloufi-Mouha, 2026). L'avenir réside moins dans le remplacement que dans l'augmentation cognitive mutuelle, où la modélisation computationnelle et la didactique des mathématiques s'enrichissent l'une l'autre pour servir une vision humaniste et exigeante de l'apprentissage.

5. L'apprentissage collaboratif humain-IA générative

L'IA générative introduit une nouvelle forme d'interaction cognitive, dans laquelle la machine ne se limite plus à exécuter des tâches, mais devient un **partenaire cognitif**. L'apprentissage collaboratif humain-IA peut être défini comme un processus sociocognitif de co-construction des connaissances, reposant sur une interaction réflexive, adaptative et créative.

Dans ce cadre, l'IA apporte une capacité de génération, de variation et de rétroaction rapide, tandis que l'humain conserve un rôle central d'interprétation, de validation et de décision épistémique. La collaboration n'est véritablement effective que lorsque l'IA apporte une valeur cognitive nouvelle, au-delà d'une simple accélération de l'exécution.

6. Étude de cas : collaboration enseignant-IA générative dans la conception d'une évaluation

6.1. Présentation de l'expérimentation et premiers résultats

Une étude de cas a été menée auprès de huit enseignants universitaires enseignant en première année en génie informatique. Ces enseignants ont utilisé dans une perspective collaborative ChatGPT pour co-concevoir un sujet d'examen de mathématiques. Les données recueillies incluent les interactions enseignant-IA, les productions finales et des entretiens de retour d'expérience.

L'analyse, fondée sur le cadre du *Mathematical Knowledge for Teaching* (Ball et al., 2008), la taxonomie de Bloom révisée (Anderson & Krathwohl, 2001) et les théories de l'apprentissage collaboratif, met en évidence différents niveaux de collaboration : absence de collaboration, collaboration limitée à la réplication, et collaboration itérative riche.

Les résultats montrent que l'apprentissage collaboratif se manifeste par un cycle itératif d'exploration, de reformulation et d'amélioration. Les enseignants développent une rigueur conceptuelle accrue, un raisonnement critique renforcé et des compétences de scénarisation des tâches d'évaluation. Cette interaction favorise également une forme de métacognition orientée vers l'outil, contribuant au développement d'une *IA literacy* professionnelle.

6.2. Discussion et perspective



La collaboration enseignant–IA génératrice apparaît comme une nouvelle forme d’apprentissage professionnel, caractérisée par une asymétrie productive : l’enseignant demeure le décideur épistémique et pédagogique, tandis que l’IA agit comme amplificateur cognitif et stimulateur d’exploration. Cette configuration soulève néanmoins des enjeux éthiques, didactiques et méthodologiques majeurs, notamment en termes de responsabilité, de validation des savoirs et d’inclusion.

7. Conclusion générale

L’apprentissage constitue un cadre unificateur permettant d’articuler intelligence humaine et intelligence artificielle. Si les systèmes d’IA génératrice n’apprennent pas comme les humains, leurs mécanismes d’approximation, de généralisation et d’ajustement par rétroaction s’inspirent de processus cognitifs humains. L’apprentissage collaboratif humain–IA fait ainsi émerger une intelligence hybride, fondée sur la complémentarité entre expertise humaine et capacités génératives des machines. Modéliser l’apprentissage, c’est alors comprendre comment ces deux formes d’intelligence peuvent s’articuler pour enrichir la pensée mathématique et renouveler les pratiques éducatives.

Références bibliographiques

1. Anderson, L. W., & Krathwohl, D. R. (2001). *A taxonomy for learning, teaching, and assessing: A revision of Bloom's taxonomy of educational objectives: complete edition.* Addison Wesley Longman, Inc.. ISBN: 0-321-08405-5 978-0-321-08405-7
2. Ball, D. L., Thames, M. H., & Phelps, G. (2008). Content knowledge for teaching: What makes it special? *J. Teach. Educ.*, vol. 59, n5, p. 389–407. <https://doi.org/10.1177/0022487108324554>
3. Ji, Z., Lee, N., Frieske, R., Yu, T., Su, D., Xu, Y., ... & Fung, P. (2023). Survey of hallucination in natural language generation. *ACM Computing Surveys*, 55(12), 1–38. <https://doi.org/10.1145/3571730>
4. Khalloufi-Mouha, F. (2026, à paraître). ChatGPT as a Tool for Assessment Design in Higher Education: How Educators' Mathematical Knowledge Shapes AI-Generated Exams In: Lahby, M., Schaeffer, S. E., Maleh, Y. and Paliktzoglou, V. (eds) *Generative AI in Higher Education Assessment Theory, Practice, and Ethical Implications*. Springer. ISBN: N978-3-032-01638-6 <https://link.springer.com/book/9783032016379>
5. Khalloufi-Mouha, F. (2024). Exploring the interaction between teachers and ChatGPT in developing a teaching session: How does the Mathematical Knowledge for Teaching shape this interaction? In: Lahby, M., Maleh, Y., Buccharone, A., Schaeffer, S.E. (eds) *General Aspects of Applying Generative AI in Higher Education*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-65691-0_7
6. Newell, A., & Simon, H. A. (1972). *Human problem solving*. Prentice Hall.
7. Rumelhart, D. E., Hinton, G. E., & Williams, R. J. (1986). Learning representations by back-propagating errors. *nature*, 323(6088), 533-536. <https://doi.org/10.1038/323533a0>
8. Siemens, G., & Baker, R. S. D. (2012, April). Learning analytics and educational data mining: towards communication and collaboration. In *Proceedings of the 2nd international conference on learning analytics and knowledge* (pp. 252-254). <https://doi.org/10.1145/2330601.2330661>
9. Sleeman, D., & Brown, J. S. (1982). *Intelligent tutoring systems* (pp. 345-pages). London: Academic Press.





COGMATHIA2025



Table ronde

Apprentissages humains et artificiels : Apports croisés des sciences cognitives, des mathématiques appliquées et de la didactique des mathématiques pour penser les interactions entre cognition humaine et cognition artificielle

Chair de la table ronde

Sonia Ben Nejma, Université de Carthage

Panélistes (par ordre alphabétique)

Ghazi Chakroun, Université de Sfax
Benoît Delahaye, Université de Nantes
Fabien Emprin, Université de Reims
Bassem Hamed, Université de Sfax
Guillaume Jouve, Université de Lille
Faten Khaloufi, Université de Carthage

Edition ARDECOST & ATDM

2025





Communications

GT 1 - Modélisation de l'apprentissage humain - approches cognitives et mathématiques

→ Expérimentation sur l'enseignement de la programmation orientée objet via les SLWE, Klouz A. et al., Université de Carthage

GT 2 - Cognition humaine et IA - inspirations, transferts et limites

→ De la modélisation mathématique aux simulations biomédicales, Awadi R. et al., Université de Tunis el Manar

GT3 - Enjeux éthiques et impacts sociétaux des modèles d'apprentissage

→ Enjeux de la responsabilité sociétale des universités : équité, diversité, intégrité et modélisation de l'apprentissage à l'ère de l'IA, Langar S. et al., Université de Manouba



Expérimentation sur l'enseignement de la Programmation Orientée Objet via les SLWE dans le cycle préparatoire en Tunisie

Ajda Klouz¹, Rahim Kouki²

¹ Université de Carthage, Institut préparatoire aux études d'ingénieurs de Bizerte,
ajda.klouz@ipeib.ucar.tn

² Université de Carthage, Institut supérieur des cadres de l'enfance, Carthage Dermech.
rahim.kouki@ipeiem.utm.tn

Résumé

L'apprentissage de la programmation orientée objet (POO) en Python dans le cycle préparatoire aux études d'ingénieurs en Tunisie présente des difficultés majeures. Ces difficultés sont notamment liées au changement de paradigme (Linard, 2002) et à la charge cognitive conséquente (Puma, 2016). Ce travail propose l'utilisation des exemples résolus avec objectifs étiquetés (Subgoal Labeled Worked Examples - SLWE) comme outil didactique pour faciliter la transposition didactique des concepts de la POO (Klouz et Kouki, 2023). Nous avons mené une étude praxéologique du programme de la matière informatique, une enquête auprès de 18 enseignants et une étude statistique auprès des étudiants de l'IPEIB ont été menés. Les résultats montrent que les SLWE améliorent significativement l'assimilation des concepts de la POO. L'étude suggère également d'adapter les stratégies d'enseignement et d'augmenter le temps didactique consacré à la POO dans ce contexte.

Mots clés

Modélisation de l'apprentissage, Théorie de la charge cognitive, Théorie anthropologique du didactique, Programmation orientée objet, Didactique expérimentale.

I. Introduction

1. Problématique

La programmation orientée objet (POO) est un paradigme clé dans la formation en programmation. Cependant, son enseignement dans le cycle préparatoire aux études d'ingénieurs en Tunisie reste problématique en raison des difficultés d'assimilation des concepts tels que l'abstraction, l'héritage et le polymorphisme (Haddad et Kouki, 2023). Le programme officiel de 2016 a introduit la POO en Python au niveau de la 2^{ème} année du cycle préparatoire, allouant un temps didactique de huit heures. Cette charge horaire a été jugé insuffisante par la majorité des enseignants d'après une enquête effectuée par Mezienne. M (Mezienne et Kouki, 2023). Notre recherche vise à tester l'apport des SLWE, outil didactique basé sur l'apprentissage explicite, afin de faciliter l'apprentissage de la POO dans ce contexte spécifique.

2. Cadres théoriques

Cette étude s'appuie sur deux cadres théoriques principaux. La théorie anthropologique du didactique (TAD) de Chevallard. Y (Chevallard, 1991) permet d'analyser les praxéologies institutionnelles et la transposition didactique des savoirs. La théorie de la charge cognitive (TCCog) de Sweller, J (Sweller, 1988) explique les effets de la complexité cognitive sur l'apprentissage et justifie l'usage d'exemples résolus avec objectifs étiquetés pour réduire la surcharge cognitive. Les SLWE sont un outil didactique structurant la résolution de problèmes en sous-objectifs à l'aide d'exemples

découpés en étapes et annotées par des commentaires explicatifs (Margulieux et al., 2013; Goletti et al., 2022). Ces deux cadres se complètent pour mieux cibler les difficultés d'assimilation en POO.

II. Méthodologie

Dans un souci de rigueur scientifique, nous avons décidé d'étudier toutes les facettes et tous les intervenants dans notre expérimentation. Pour se faire, nous avons établis cinq étapes :

1. Étude praxéologique du programme de la deuxième année du cycle préparatoire

Dans cette première étape de notre expérimentation nous faisons intervenir l'approche praxéologique de la TAD. Cette approche nous permet d'analyser toutes les praxéologies mentionnées dans le programme officiel (Kouki, 2017) et les concepts de la POO qui y sont directement reliés. Chevallard décrit l'approche praxéologique comme une action composée d'une tâche t d'un certain type T , au moyen d'une technique τ , justifiée par une technologie θ qui permet de la penser, voire de la produire, et qui à son tour est justifiable par une théorie Θ (Chevallard, 1997). Le quadruplet ainsi obtenu est noté $[T/\tau/\theta/\Theta]$ et porte le nom de : « Organisation didactique ou mathématique ». Nous pouvons dire que l'approche praxéologique est une approche de recherche qui se concentre sur l'analyse des pratiques sociales dans leur contexte spécifique, en mettant l'accent sur l'action consciente des individus dans leur environnement.

Le tableau 1 détaille deux organisations didactiques de deux types de tâches que l'enseignant doit transposer en classe.

Tableau 1 : Exemples de deux organisations praxéologiques du chapitre POO

Types de tâches (T)	Technique (τ)	Technologie (θ)	Théorie (Θ)
T1 : Créer une classe mère	<code>class nom_classe (object) :</code>	Création d'une classe sans héritage	Concept de « Classe », POO
	<code>class nom_classe () :</code>		
	<code>class nom_classe :</code>		
T2 : Définir le constructeur de la classe	<code>def __init__(self,.....) :</code>	Définition d'une méthode	Programmation procédurale en Python

Cette étape justifiera le choix des SLWE qui seront utilisés lors de l'expérimentation. En effet ils devront prendre en compte toutes les praxéologies présentes dans le programme officiel dégagées lors de cette première étape.

2. Questionnaire destiné aux enseignants d'informatique du cycle préparatoire

Dans une deuxième étape nous avons élaboré un questionnaire destiné aux enseignants d'informatique des instituts préparatoires aux études d'ingénieurs. Ce questionnaire vise à connaître les avis des enseignants par rapport au contenu du module POO et de la charge allouée et de mettre l'accent sur les éventuelles difficultés rencontrées lors de la transposition didactique des différents

concepts de la POO. Cette enquête s'est révélée fort intéressante pour justifier le reste du protocole et fournir des inputs pour l'expérimentation :

- Certains concepts de la POO tel que « Abstraction », « Héritage », « Encapsulation » et « Polymorphisme » sont plus difficilement assimilables que le reste des concepts : « Classe », et « Objet » d'après les enseignants.
- 66.7 % des enseignants jugent que les 8h prévues semblent être « très peu suffisantes » car il s'agit de nouveaux concepts et d'un nouveau paradigme à adopter.
- La plupart des enseignants (72.2%) adoptent délibérément les exemples corrigés avec étiquetage des étapes (SLWE) sans savoir pour autant qu'il s'agit d'un outil didactique à part entière. Les SLWE semblent faire partie de la stratégie d'enseignement adoptée par les enseignants et ce choix se fait de façon spontanée puisque 77.8% des enseignants ne connaissent pas cet outil.

L'introduction de nouveaux concepts, le changement de paradigme ainsi qu'une charge horaire jugée « très peu suffisante » font que l'enseignement de la POO nécessite l'adoption de stratégie didactique réfléchies pour faciliter le processus de transposition didactique.

Toutes ces raisons nous confortent dans le choix des SLWE comme outil didactique sujet de notre investigation expérimentale. Néanmoins, les enseignants émettent certaines conditions pour garantir une éventuelle efficacité des SLWE. Les conditions les plus récurrentes sont : le choix convenable et réfléchis des exemples qui seront proposés et l'utilisation de cet outil précisément lors de la partie introductory du cours.

L'expérimentation a été réalisée à l'Institut Préparatoire aux Études d'Ingénieurs de Bizerte (IPEIB) sur un échantillon de 128 étudiants répartis sur deux sections : Mathématiques/Physique (MP) et Physique/Chimie (PC). L'échantillon a été divisé en deux groupes :

- Groupe expérimental (65 étudiants) : Enseigné avec les SLWE incorporés lors de l'introduction des concepts de la POO.
- Groupe témoin (63 étudiants) : Enseigné selon une méthode classique sans SLWE.

3. Pré-test

Un pré-test a été administré avant l'expérimentation pour évaluer les prérequis et vérifier l'homogénéité des groupes. Le test portait principalement sur la syntaxe et les notions basiques de la POO déjà vues implicitement en première année, couvrant les concepts d'objet, classe et encapsulation qui sont les seuls concepts étudiés lors de la première année.

Ci-dessous, le tableau 2 récapitule les résultats trouvés lors du pré-test.

Tableau 2 : Résultats du pré-test

Groupe	Effectif	Moyenne des scores au pré-test : \bar{X}	Écart-type : σ	Indice de dispersion : $(\sigma / \bar{X}) * 100$
Expérimental	65	13,11	2,41	0.18
Témoin	63	13,31	1,92	0.14

Notons que l'homogénéité a été confirmée pour les deux groupes (témoin et expérimental) avant intervention à la suite du test de Levene qui a donné comme valeur 0.148 (> 0.05).

4. Expérimentation

L'expérimentation s'est déroulée en quatre séances de 2 heures chacune, respectant le temps didactique officiel (8 heures) pour le chapitre POO. À chaque début de séance, les étudiants du groupe expérimental recevaient l'énoncé d'un exercice accompagné par son SLWE, c'est-à-dire une solution décomposée en étapes, annotée par l'objectif pédagogique spécifique à chaque étape, permettant un apprentissage structuré comme le montre la figure 1.

Ex1: On désire créer une forme géométrique. Pour ceci nous utilisons le concept de « classe » défini par la programmation orientée objet. Une forme géométrique est caractérisée par un nom et un nombre de côtés.

- a. Déclarer la classe « **formegemetrique** » qui comporte :
- b. Un constructeur permettant d'instancier des objets de type « **formegemetrique** », ayant l'attribut « nom » dont la valeur est entrée en paramètre
- c. Une méthode classique « **Affichage_nom** » qui permet de retourner le nom de la forme géométrique

Solution :

```

a { class formegemetrique( ): #a1- Déclarer une classe mère avec le mot standard class suivi du nom de la classe (sans paramètres).
    Ici, on parle des formes géométriques en général, on dit qu'on fait de l'abstraction

    def __init__(self,n): #b1- Entête du constructeur de la classe: fonction obligatoire dans toute classe c'est le générateur des objets.
        Toutes les fonctions de la classe prennent obligatoirement comme premier paramètre self qui est un objet virtuel
        self.nom=n #b2- notre objet est caractérisé par un seul attribut qui est le nom :

    def Affichage_nom(self): #c1- Entête de la méthode simple de la classe, le premier paramètre est forcément self : l'objet virtuel
        return self.nom #c2- Retourner le nom de l'objet virtuel self
  
```

Figure 1 : Exemple résolu avec objectifs étiquetés utilisé lors de l'expérimentation

5. Post-test et résultats

À la fin de l'expérimentation, un post-test composé de 20 questions (QCM et questions ouvertes) a été passé pour évaluer la maîtrise des concepts clés de la POO : Objet, Classe, Abstraction, Héritage, Polymorphisme et Encapsulation. Les résultats sont récapitulés au niveau du tableau 3.

Tableau 3 : Résultats du post-test

Groupe	Effectif	Moyenne totale du post-test X	Écart-type σ	Indice de dispersion (σ / X) * 100
Expérimental	61	16,16	1,61	9.90
Témoin	51	14,33	1,73	12.07

Le tableau 3 montre une amélioration statistiquement significative des performances du groupe expérimental par rapport au groupe témoin (Test de Mann-Whitney, $p < 0,001$).

Les étudiants ayant bénéficié des SLWE ont obtenu de meilleures moyennes sur tous les concepts, avec un écart plus marqué sur les concepts : Classe et Objet.

III. Conclusion

L'introduction de nouveaux concepts et le changement de paradigme ainsi qu'une charge horaire jugée « très peu suffisante » font que l'enseignement de la POO nécessite l'adoption de stratégie didactique réfléchies pour faciliter le processus de transposition didactique.

L'expérimentation réalisée montre clairement que l'intégration des SLWE dans l'enseignement introductif de la Programmation Orientée Objet (POO) en Python permet une amélioration significative de l'acquisition des concepts clés par les étudiants. Cette amélioration est particulièrement notable pour les notions qui sont habituellement considérées comme difficiles à assimiler, telles que l'encapsulation, l'héritage ou le polymorphisme. Par ailleurs, cette méthode innovante respecte parfaitement le temps didactique officiel, ce qui garantit qu'elle peut s'intégrer sans perturber le déroulement des programmes universitaires. Cela rend les SLWE non seulement efficaces pédagogiquement, mais aussi pragmatiques et adaptables aux contraintes institutionnelles.

Les résultats ainsi obtenus soulignent ainsi l'intérêt majeur des SLWE pour la transposition didactique de la POO au niveau du cycle préparatoire. En s'appuyant sur des approches théoriques solides, notamment la théorie de la charge cognitive et la théorie anthropologique du didactique, qui analysent l'enseignement en fonction des pratiques sociales et culturelles, l'usage des SLWE semble particulièrement pertinent. Cet outil favorise une meilleure gestion des ressources cognitives des apprenants en proposant des activités adaptées, progressives et contextualisées, ce qui facilite la construction des savoirs.

Références :

- Chevallard, Y. (1991). Concepts fondamentaux de la didactique : Perspectives apportées par une approche anthropologique. *Publications mathématiques et informatique de Rennes*, (S6), 160–163.
- Chevallard, Y. (1997). Familière et problématique, la figure du professeur. *Recherches en didactique des mathématiques*, 17, 17-54.
- Goletti, O., De Pierpont, F., & Mens, K. (2022, May). Crédit d'exemples résolus avec objectifs étiquetés pour l'apprentissage de la programmation avec Python. In *L'informatique, objets d'enseignement et d'apprentissage. Quelles nouvelles perspectives pour la recherche ?*
- Haddad, M. & Kouki, R. (2023). État des lieux de l'enseignement et l'apprentissage de la programmation orientée objet dans le contexte universitaire tunisien. *RASEF*, 87-96.
- Klouz, A. & Kouki, R. (2023). Enseignement introductif de la Programmation Orientée Objet sous Python via les exemples résolus avec objectifs étiquetés : Cas des instituts préparatoires aux études d'ingénieurs tunisiens. *RASEF*, 246-258.
- Kouki, R. (2017). *Recherches sur l'articulation des dimensions sémantique, syntaxique, sémiotique, praxéologique et épistémologique dans l'enseignement et l'apprentissage des mathématiques : Étude de cas : algèbre du secondaire et développements limités au début de l'université* (Note de synthèse pour l'habilitation à Diriger des Recherches). Université de Tunis El Manar.
- Linard, M. (2002). Conception de dispositifs et changement de paradigme en formation. *Éducation Permanente*, (152), 143–155.

Margulieux, L., Catrambone, R., & Guzdial, M. (2013). Subgoal labeled worked examples improve K-12 teacher performance in computer programming training. In *Proceedings of the Annual Meeting of the Cognitive Science Society* (Vol. 35, No. 35).

Mezienne, M., & Kouki, R. (2023). Ébauche d'ingénierie de développement de situation d'enseignement des concepts de la POO via l'approche par emboîtement. *RMEMST 1 (MJMSTE 1)*, 129-144. Éditions ATDM : Tunisie.

Puma, S. (2016). *Optimisation des apprentissages : Modèles et mesures de la charge cognitive* (Thèse de doctorat, Université Toulouse le Mirail-Toulouse II).

Sweller, J. (1988). Cognitive load during problem solving: Effects on learning. *Cognitive Science*, 12(2), 257–285.

De la modélisation mathématique aux simulations biomédicales

Rania AWADI¹, Narjes Benameur¹, Salam Labidi¹

¹Laboratoire de biophysique et technologies médicales, université de Tunis El Manar , Institut Supérieur ders technologies médicales de Tunis ,Tunisie

Résumé

Les maladies cardiovasculaires, notamment l'infarctus du myocarde, entraînent un remodelage structurel et fonctionnel du ventricule gauche. L'imagerie par résonance magnétique permet d'observer ces altérations, mais n'évalue pas directement les propriétés mécaniques du myocarde. Cette étude combine reconstruction 3D du ventricule et modélisation mécanique pour estimer des paramètres spécifiques des sujets. Un algorithme hybride de cartographie fibrillaire assure des orientations de fibres réalistes, fidèles aux données histologiques. Les résultats offrent une évaluation personnalisée du remodelage post-infarctus et ouvrent la voie à une meilleure planification thérapeutique.

Mots clés : Ventricule gauche, modélisation, simulation, algorithme

Introduction

Les maladies cardiovasculaires représentent la première cause de mortalité dans le monde et constituent un enjeu majeur de santé publique [1]. Parmi ces affections, l'infarctus du myocarde (IDM) est l'une des plus fréquentes et entraîne des remaniements structurels et fonctionnels du muscle cardiaque, connus sous le nom de remodelage myocardique. Ces altérations peuvent conduire à une insuffisance cardiaque sévère, rendant essentielle une évaluation précoce et précise de l'état mécanique du ventricule [2].

En pratique clinique, l'évaluation des pathologies cardiaques repose principalement sur des techniques d'imagerie telles que l'électrocardiogramme, la coronarographie ou l'imagerie par résonance magnétique (IRM) [3]. Bien que ces méthodes permettent de détecter des anomalies structurelles et fonctionnelles, elles ne fournissent pas directement d'informations sur les propriétés mécaniques du myocarde, notamment sa contractilité et sa rigidité, paramètres clés pour comprendre la progression du remodelage et prédire la réponse aux traitements [4].

Dans ce contexte, la modélisation biomécanique constitue un outil puissant pour combler cette lacune. Elle permet non seulement de reconstruire la géométrie ventriculaire et de générer des cartes d'orientation des fibres myocardiques, mais aussi d'estimer quantitativement les propriétés mécaniques du tissu cardiaque. L'orientation des fibres joue un rôle central dans ce processus, car elle conditionne l'anisotropie mécanique et électrique du myocarde.

L'estimation des paramètres biomécaniques joue un rôle central dans la modélisation du myocarde, car elle permet de caractériser sa contractilité et sa rigidité, deux propriétés essentielles pour comprendre le comportement mécanique du ventricule et évaluer le remodelage post-infarctus.

Cependant, l'obtention de valeurs précises pour ces paramètres demeure un défi majeur, en particulier à partir de données *in vivo*. Les approches classiques basées uniquement sur l'imagerie ne permettent pas de quantifier directement ces propriétés. Pour surmonter cette limitation, des méthodes combinant reconstruction géométrique 3D du ventricule et simulations biomécaniques par éléments finis ont été développées. Ces méthodes utilisent les informations structurelles et fonctionnelles disponibles pour calibrer des modèles capables de prédire de manière fiable la contractilité et la rigidité du tissu myocardique, offrant ainsi un outil puissant pour l'évaluation individuelle du remodelage cardiaque et pour la planification de traitements personnalisés.

Un aperçu des principales contributions de la recherche est présenté ci-dessous :

- **Reconstruction géométrique précise du ventricule gauche** à partir d'images IRM, minimisant les erreurs liées à l'épaisseur des coupes.
- **Développement d'un algorithme hybride pour la cartographie fibrillaire**, combinant Laplace–Dirichlet, croissance régionale et éléments finis, pour générer des orientations de fibres lisses et fidèles aux données histologiques.
- **Estimation des paramètres mécaniques du myocarde**, à partir de la géométrie et de la cartographie obtenues.

Matériel et méthodes

Modélisation du VG

Dans ce travail, nous nous focalisons sur le ventricule gauche (VG), cavité cardiaque qui peut être étudiée *in vivo* et de manière non invasive grâce à l'imagerie par résonance magnétique (IRM). Afin de construire une représentation tridimensionnelle précise, les contours endocardiques et épicardiques du VG ont été segmentés aux phases télesystolique (TS) et Télediastolique (TD) de manière semi-automatique à l'aide du logiciel CVI42 (© Circle Cardiovascular Imaging). Les contours segmentés sont exportés au format STL (stéréolithographie), décrivant la surface sous forme de maillage triangulé. Les surfaces endocardique et épicardique du VG a ensuite été traité dans CATIA V5 (© Dassault Systèmes) afin de reconstruire les surfaces du VG. Une section transversale bidimensionnelle a été définie puis pivotée autour d'un axe central, permettant la création d'une géométrie 3D fidèle du VG (Figure 1). Enfin, cette géométrie a été exportée au format STEP et maillée en éléments hexaédriques dans le logiciel d'éléments finis ABAQUS (© Dassault Systèmes), comme illustré à la Figure 1.

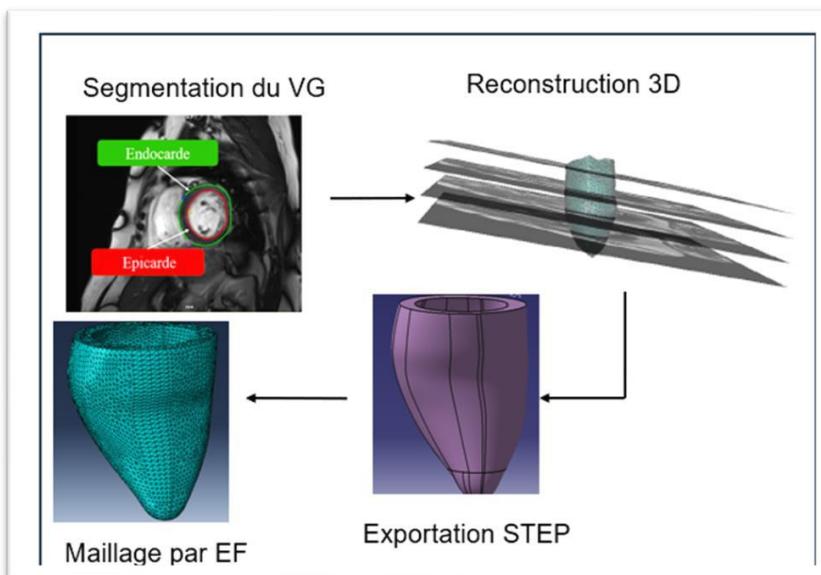


Figure 1: Géométrie du VG en télésystole

Orientation des fibres myocardiques

Nous avons appliqué une orientation des fibres basée sur des règles afin d'identifier les propriétés mécaniques du myocarde. Dans ce travail, la structure des fibres myocardiques a été attribuée à l'aide de l'algorithme basé sur des règles (LDRF). L'algorithme LDRF a développé en s'appuyant sur les méthodologies proposées par Palit et al. [5] et Wong et Kuhl [6]. Une avancée clé de cet algorithme est l'identification automatique de divers domaines de surface, améliorant la précision et l'efficacité du processus de modélisation. L'idée clé de notre algorithme d'orientation des fibres est de développer une interpolation fluide et sans coordonnées des orientations des fibres en utilisant des techniques issues de l'infographie, en particulier celles inspirées des méthodes d'interpolation basées sur les caractéristiques. L'équation de Laplace suivante est résolue pour la caractéristique à valeur scalaire φ , qui sert de base pour guider le processus d'interpolation et assurer une orientation cohérente et continue des fibres à travers le domaine :

$$\Delta\varphi = 0, \text{ en domaine } \Psi \quad (1.1)$$

Pour des conditions aux limites de Dirichlet données :

$$\varphi = \bar{\varphi}, \text{ en } \partial\Psi \quad (1.2)$$

La fonction à valeur scalaire φ , est régie par l'équation de Laplace $\Delta\varphi = 0$, qui assure une interpolation douce et linéaire dans le domaine cardiaque lorsque des conditions aux limites de Dirichlet sont imposées sur $\partial\Psi$. Pour résoudre cette équation aux dérivées partielles (EDP), nous avons utilisé une approche par EF. Dans cette étude, nous avons discrétisé le domaine Ψ à l'aide d'éléments tétraédriques à quatre nœuds. L'EDP a ensuite résolue sous les conditions aux limites de Dirichlet données définies sur $\partial\Psi$, avec φ étant la principale variable inconnue. Nous avons formulé l'algorithme LDRF à l'aide de trois fonctions distinctes, chacune acceptant trois entrées, comme expliqué ci-dessous.

Trois paramètres d'entrée sont nécessaires pour l'algorithme LDRF, comme suit :

- Une géométrie du VG (3D) avec un maillage en EF.
- Un nuage de points correspondant au plan parallèle au plan de coupe de l'image en axe court, situé juste en dessous de l'intersection basale-endocarde.
- La définition des angles des fibres basée sur les données histologiques. Nous avons supposé que les fibres sur l'épicarde du VG ($\partial\Psi_{epi}$) étaient inclinées avec $-\alpha_1$ et que les fibres sur l'endocarde du VG ($\partial\Psi_{endo}$) étaient inclinées avec $+\alpha_2$ par rapport à la direction circonférentielle locale du VG. Si l'on suppose que $\alpha_1 = \alpha_2 = 60^\circ$. Après, c'est l'implémentation de l'algorithme LDRF, il est implémenté dans Matlab (Matlab, R2018a, The MathWorks, USA).

Comportement des matériaux et conditions aux limites

Nous avons utilisé, un modèle constitutif hyperélastique transversalement isotrope qui a été proposé par Fung et al. [94] proposé à la base par Guccione et al. [7]. La loi de Fung est composée de quatre paramètres, \mathbf{C}_0 , \mathbf{b}_f , \mathbf{b}_t et \mathbf{b}_{ft} qui décrivent le degré de non-linéarité et d'anisotropie. La densité d'énergie de déformation $\Psi(\mathbf{E})$.

$$\Psi(\mathbf{E}) = \frac{C_0}{2}(e^Q - 1) \quad (1.3)$$

Où \mathbf{C}_0 est le paramètre linéaire passif, Q est la fonction quadratique des trois composantes principales de la déformation, \mathbf{b}_f et \mathbf{b}_t représentent la rigidité au niveau de la fibre myocardique locale et dans la direction transversale, respectivement, et \mathbf{b}_{ft} est la rigidité de cisaillement. Les coefficients de l'équation (1.3) ont été reproduits par Gerardo et al.[4] où \mathbf{C}_0 a été fixé à 0.08 kPa et \mathbf{b}_f , \mathbf{b}_t et \mathbf{b}_{ft} ont été fixés à 16.15, 6.46 et 11.31, respectivement.

La surface épicardique a été soumise à des conditions limites homogènes de Neumann (imposent que la dérivée normale est nulle, donc aucune variation dans cette surface), tandis que la surface de l'endocarde a été soumise à une pression du VG uniforme. La ligne basale a été fixée pour tenir compte de la rigidité nettement plus élevée de l'anneau par rapport au myocarde.

Identification des paramètres biomécaniques

Le nombre de paramètres passifs à identifier est réduit à deux : \mathbf{C}_0 et \mathbf{b}_f . Ces paramètres passifs ont été identifiés en minimisant l'écart par rapport à la courbe de (RPVTD), telle que prédicta par Klotz et al. [151]. L'algorithme d'optimisation de Nelder-Mead, disponible dans Matlab (MathWorks), a été utilisé. Il s'agit d'un processus d'optimisation en deux boucles, inspiré de l'approche de Genet et al.[8]. La boucle externe s'est concentrée sur l'optimisation de \mathbf{b}_f en minimisant l'écart par rapport à la courbe de Klotz, qui représente la (RPVTD) standard. À chaque itération de cette boucle externe, une boucle interne était exécutée pour ajuster \mathbf{C}_0 pour le \mathbf{b}_f donné.

Résultats et discussion

La méthode de modélisation a été appliquée à 5 sujets humains sains. L'orientation des fibres myocardiques est présentée à la Figure 2. Le Tableau 1 rapporte, pour chaque sujet ainsi que pour la moyenne et l'écart-type, les volumes (TS) et (TD) obtenus par IRM, ainsi que les fractions d'éjection correspondantes. Les valeurs moyennes des volumes (TS) et (TD) et la fractions d'éjection restent dans une plage normale pour des sujets adultes. La faible variabilité observée entre les sujets démontre la cohérence et la fiabilité de la procédure.

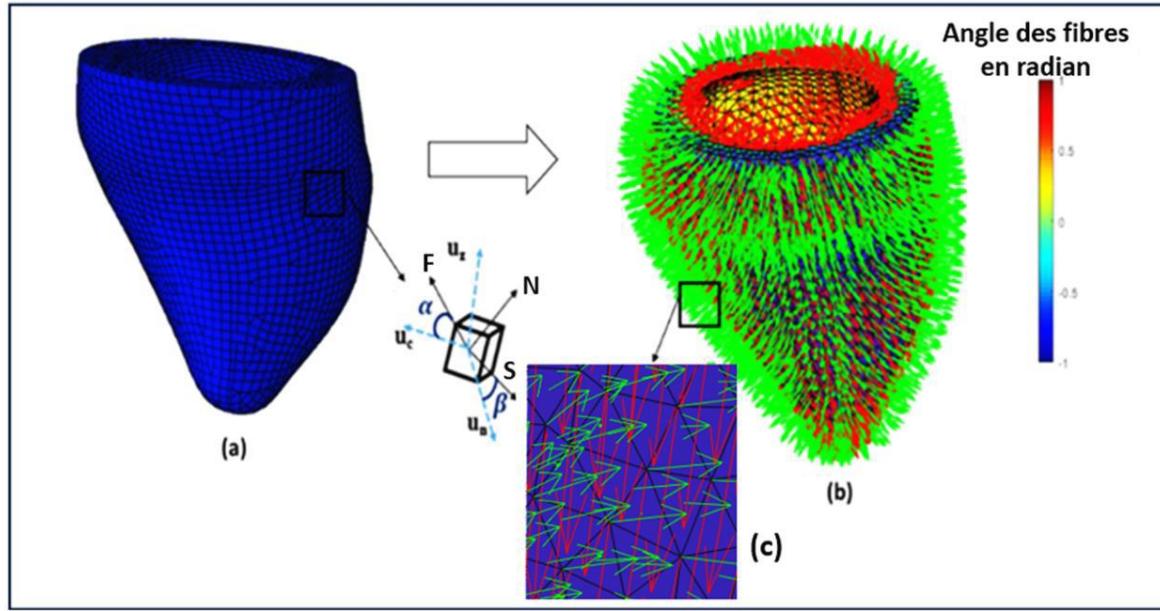


Figure 2: Illustration de l'orientation des fibres myocardiques

Tableau 1 : Volumes télédiastolique et télésystolique mesurés par IRM, ainsi que la fraction d'éjection correspondante, pour les cinq sujets sains

Sujets	#1	#2	#3	#4	#5	Moyenne	Écart type
Volume TS (ml)	24	34	56	36	56	41.2	14.25
Volume TD (ml)	59	73	105	82	64	76.6	18.15
Fraction d'éjection (%)	53	55	60	58	54	56.0	2.92

Tableau 2 : les paramètres mécaniques passifs du myocarde identifiés pour chaque sujet

Sujets	#1	#2	#3	#4	#5	Moyenne	Écart type
C_0 (KPa)	0.123	0.095	0.103	0.074	0.106	0.100	0.018
b_f	10.72	14.67	14.50	17.08	14.19	14.23	2.28
b_t	4.29	5.87	5.80	6.83	5.68	5.69	0.91
b_{ft}	7.51	10.27	10.15	11.96	9.93	9.96	1.59

Le Tableau 2 fournit les paramètres mécaniques passifs du myocarde identifiés pour chaque sujet, avec leurs valeurs moyennes et écarts-types. La variabilité entre ces cinq sujets normaux est assez faible.

Conclusion

Ce travail met en évidence l'importance d'une approche intégrée combinant imagerie médicale et modélisation biomécanique pour évaluer de manière précise le remodelage myocardique post-

infarctus. La reconstruction géométrique fine du ventricule gauche à partir d'IRM, associée à la cartographie rigoureuse des fibres myocardiques, permet de reproduire fidèlement l'anatomie et l'orientation fibrillaire du tissu cardiaque. L'estimation des paramètres mécaniques offre une vision quantitative et personnalisée du comportement mécanique du myocarde, dépassant les limites des méthodes d'imagerie classiques. Les perspectives futures incluent l'intégration de données fonctionnelles dynamiques et le développement de modèles prédictifs capables d'anticiper l'évolution de la fonction ventriculaire, ouvrant la voie à une médecine cardiovasculaire plus personnalisée et préventive.

Références

- [1] Journal des femmes Santé. (2023). « *Coeur : Anatomie, rôle, opération, maladies cardiovasculaires* ».
- [2] J.W. Holmes, T.K. Borg, J.W. Covell . (2005)« *Structure and mechanics of healing myocardial infarcts* ». Annual Review of Biomedical Engineering, 7, p. 223-253.
- [3] Garza, M. A., Wason, E. A., & Zhang, J. Q. (2023). Cardiac remodeling and physical training post myocardial infarction. *World Journal of Cardiology*, 7(2), 52–64. <https://dx.doi.org/10.4330/wjc.v7.i2.52>
- [4] Rumindo, G. K., Ohayon, J., Croisille, P., & Clarysse, P. (2020). In vivo estimation of normal left ventricular stiffness and contractility based on routine cine MR acquisition. *Medical Engineering & Physics*, 85, 16–26.
- [5] Palit, A., Bhudia, S. K., Arvanitis, T. N., Turley, G. A., & Williams, M. A. (2015). Computational modelling of left-ventricular diastolic mechanics: Effect of fibre orientation and right-ventricle topology. *Journal of Biomechanics* 48(4), 604–612.
- [6] Wong, J., & Kuhl, E. (2014). Generating fibre orientation maps in human heart models using Poisson interpolation. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, 17(11), 1217–1226.
- [7] Guccione, J. M., Costa, K. D., & McCulloch, A. D. (1995). Finite element stress analysis of left ventricular mechanics in the beating dog heart. *Journal of Biomechanics*, 28(10), 1167–1177.

enjeux de la responsabilité sociétale des universités : équité, diversité, intégrité et modélisation de l'apprentissage à l'ère de l'intelligence artificielle et des sciences cognitives

Dr. Saloua Langar, enseignante à l’Institut Supérieur de Comptabilité et d’Administration des Entreprises (ISCAE) Manouba, Tunisie, email : saloualangar2020@gmail.com

Dr. Amira Berrahal, enseignante à l’Institut Supérieur de Comptabilité et d’Administration des Entreprises (ISCAE) Manouba, Tunisie, email: amira.berrahal8@gmail.com

Résumé

Cet article a l’ambition de savoir comment les universités, actrices engagées au sein du système universitaire, adoptent l’Intelligence Artificielle (IA) en respectant les valeurs humanistes de l’équité, de la diversité et de l’intégrité (EDI) considérées comme des critères mesurables influençant leur performance et leur réputation, et ceci à partir d’une étude du cas concernant l’implémentation de l’IA dans une université privée tunisienne en l’occurrence l’université centrale de Tunisie (UTC), à travers une analyse thématique fondée sur une entrevue diffusée sur YouTube, témoignant de la position de la directrice générale du réseau "Honoris United Universities" sur l’intégration de l’IA dans la pédagogie universitaire.

Mots-clés : Modélisation de l’apprentissage, IA, Cognition humaine, RSU, EDI.

Introduction

Il est indéniable que les universités en adhérant aux valeurs de la RSU jouent un rôle substantiel dans la formation des futurs acteurs sociaux. La RSU a été abordée par plusieurs théories mais celle qui nous intéresse est celle du réseau-acteur pour appréhender l’introduction de l’IA et des sciences cognitives dans le domaine éducatif en offrant des parcours d’apprentissage personnalisés répondant au mieux aux attentes des étudiants. Néanmoins, cette intégration en remettant en question le rôle classique des universités par

cette dynamique techno-scientifique est sujette à des risques affectant les valeurs humanistes de la RSU. Cet article s'interroge sur la manière dont les concepts de l'EDI sont perçus dans le groupe "Honoris United Universities" qui a intégré récemment des programmes d'IA dans son cursus. Aussi, nous tentons de comprendre comment les universités en tant qu'acteurs majeurs du changement peuvent impacter les questions sociétales tout en étant en mesure de respecter les valeurs humanistes de l'EDI. En effet, l'équité, la diversité et l'intégrité sont des critères mesurables par le biais de la productivité équitable représentant un cadre d'évaluation englobant à la fois des dimensions financières, sociales et technologiques notamment dans le cas d'un recours à l'IA. Dans ce sens, les indicateurs de performance KPIs, l'analyse d'appétence aux risques technologiques et du retour sur investissement constituent des outils stratégiques pour piloter cette transformation numérique que nous tentons de relever au niveau de l'entrevue de la directrice générale du réseau de "Honoris United Universities." Les hypothèses à valider dans la partie empirique sont :

H1 : L'intégration de l'IA dans les programmes universitaires en optimisant l'individualisation de l'éducation risque d'accentuer les disparités en matière d'accès à cause des différences d'ordre technologique et socio-économique.

H2 : Les systèmes d'apprentissage basés sur l'IA pourraient générer des biais algorithmiques, compromettant l'intégrité académique et l'équité des parcours éducatifs.

H3 : La RSU est renforcée quand elle intègre spécifiquement dans ses formations des modules consacrés à l'éthique de l'IA, à la gestion des biais et à la valorisation de la diversité.

Approches théoriques

Responsabilité Sociétale des Universités (RSU)

La RSU constitue une adaptation spécifique de la responsabilité sociétale des organisations (RSO), en adéquation avec les objectifs sociétaux de l'université. Pour Freeman (1984, p.25), la RSU requiert une gouvernance impliquant la participation de toutes les parties prenantes. Etzkowitz & Leydesdorff (2000, p.111), par le biais du modèle de la triple hélice,

soutiennent l'idée que l'université opère comme un point de relais entre la société, le secteur économique et le domaine de la recherche. Les questions d'accès équitable par l'intégration de l'IA aux ressources numériques, de transparence et de respect des données personnelles deviennent de plus en plus cruciales de nos jours. L'adhésion des universités aux principes de la RSU s'avère nécessaire en vue de s'aligner sur les objectifs de développement durable, notamment l'ODD 4. Aussi, il est essentiel de maintenir l'intégrité académique, la durabilité et l'innovation responsable dans les programmes d'éducation et de recherche pour préserver les futures générations.

Équité, diversité et intégrité dans l'enseignement supérieur : des dimensions interdépendantes

L'équité socio-économique en matière d'accès à l'éducation se distingue de l'équité dans le traitement et l'équité en termes d'accomplissement. Par ailleurs, des déterminants individuels et institutionnels composent la diversité. De manière similaire, l'intégrité qui vise à créer une concordance entre la morale, la confiance et les défis numériques comme ChatGPT, se focalise principalement sur l'éthique de recherche, la clarté des décisions au sein des organisations et la lutte contre la fraude.

Modélisation de l'apprentissage : intelligence humaine et intelligence artificielle

Le développement de l'IA et son intégration dans les méthodes d'enseignement universitaire sont une préoccupation pour les parties prenantes reconfigurant les finalités mêmes de l'enseignement. Inscrivant son apport dans la théorie de l'acteur-réseau (Latour et al., 2006, p.71) selon laquelle « les objets ont une agency », l'IA se présente comme une technologie actante de transformation des pratiques de chacun dans le monde universitaire. La modélisation de l'apprentissage est à la croisée de plusieurs disciplines telles que la psychologie cognitive, les sciences de l'éducation, les neurosciences, l'IA et les mathématiques. En matière d'apprentissage par la recherche, les systèmes de tutorat intelligents constituent l'une des premières applications de l'IA en modélisation pédagogique dans l'enseignement supérieur, pour concevoir une reconfiguration des processus d'apprentissage à partir des informations générées par les réactions, les erreurs et les progrès

des étudiants, soulevant ainsi des enjeux éthiques, épistémologiques et pédagogiques. De ce fait, l'IA est-elle une révolution ou une simple évolution?

Cas empirique : L'Université Centrale de Tunis (UCT)

Présentation de l'UCT

Crée en 2001 et forte d'une expérience de plus de vingt ans d'expérience, l'UCT qui a rejoint le réseau panafricain "Honoris United Universities" en 2017, représente aujourd'hui la principale université privée en Tunisie qui offre des cursus universitaires multidisciplinaires. Avec plus de 8000 étudiants provenant d'au moins de 25 pays différents, l'interculturalité est favorisée au sein du réseau "Honoris United Universities".

Méthodologie empirique

Nous avons adopté dans notre recherche une méthode d'analyse thématique pour appréhender les représentations institutionnelles sur la RSU, l'innovation pédagogique et le déploiement de l'IA à l'UCT. Cette recherche présente la caractéristique d'être rassemblée autour d'un corpus qualitatif constitué principalement par l'entrevue publique (YouTube) de la directrice générale du réseau "Honoris United Universities", accordée pour la 7^e édition du Salon de l'emploi de l'UCT, qui s'est déroulée le 15 avril 2025, où elle a explicité les choix stratégiques rencontrés par l'université avec la transformation de la pédagogie sous l'effet des nouvelles technologies. Nous avons procédé à un traitement manuel en transcrivant l'entrevue dans son intégralité, puis en repérant les éléments majeurs en lien avec le cadre conceptuel, en repérant le discours, en appliquant un codage thématique puis en produisant une analyse réflexive des résultats.

Analyse des résultats et discussion

L'interviewée a souligné que " l'institution universitaire ne se limite pas à la délivrance de diplômes, mais soutient les étudiants dans la construction de leur futur grâce à l'intégration proactive de l'IA dans les cursus : formation au prompting pour améliorer l'efficacité, la précision et la créativité, tout en évitant les erreurs d'interprétation ou les utilisations inappropriées de l'IA, apprentissage adaptatif, ainsi que Najeh le tutor virtuel IA, déjà utilisé par des

milliers d'étudiants depuis 5 ans pour les aider dans leurs révisions et évaluations. " D'après l'interviewée, il est évident que le réseau "Honoris United Universities" met un accent fort sur l'innovation technologique, en se concentrant notamment sur la diversité. Une disparité thématique est mise en évidence entre l'application du numérique et l'incorporation des principes de la RSU. Aussi, il ressort une détermination manifeste vers la modernisation par le biais de l'innovation technologique. Nous avons pu dégager de l'entretien un tableau synoptique relatif au codage thématique :

Thème	Eléments abordés	Analyse
Modélisation de l'apprentissage et IA	IA dans les modules pédagogiques, tuteur intelligent, simulation médicale : mannequins haute fidélité, apprentissage adaptatif, plateforme lecturio	<ul style="list-style-type: none"> - Une orientation technopédagogique forte - Faire évoluer les méthodes d'enseignement - Continuité du transfert des connaissances - Mise en place d'une stratégie IA - De nouveaux profils et métiers : médecin ingénieur, data analyst
RSU	Partenariats, contribution au développement du pays, incubateurs, rôle social déterminant de l'université	La question de limitation des enjeux éthiques et environnementaux a été évoquée en vue d'éviter les conséquences négatives de l'IA
Equité	Accès équitable aux dispositifs IA	L'accessibilité réelle de ces innovations à l'ensemble des étudiants
Diversité	Empowerment, ouverture sur le continent africain, programme women	Diversité du genre et de la culture
Intégrité	Pas d'évocation sur la transparence des algorithmes	Thème non abordé : le non-dit autour des biais algorithmiques et des enjeux de transparence limite la réflexion sur une IA éthique, bien que la limitation des enjeux éthiques a été évoquée

Tableau 1 : Analyse des éléments abordés lors de l'interview au prisme des thèmes retenus

Source : Auteurs

Concernant les hypothèses émises, nous allons les confirmer ou infirmer à travers l'entrevue publique (YouTube) de l'interviewée.

H1 : un aspect qui a été partiellement validé ; cependant, le sujet des inégalités n'a pas été traité.

H2 : aucune référence aux biais algorithmiques n'a été évoquée.

H3 : aucun cadre éthique n'a été évoqué.

Conclusion

L'objectif de cette recherche, avec un apport beaucoup plus empirique que théorique, est d'analyser comment l'UCT répond aux exigences modernes de la RSU à l'aune de l'IA et des sciences cognitives. L'analyse thématique de l'entrevue avec l'interviewée du réseau "Honoris United Universities", a mis en évidence un discours axé sur l'innovation techno-pédagogique notamment avec le tutor IA Najeh, présenté comme un outil favorisant l'adaptation, l'employabilité et la révision des modes d'apprentissage. Toutefois, cette attitude positive vis-à-vis de la technologie crée des frictions latentes, particulièrement en termes de paradigmes liés à l'équité, à la diversité et à l'intégrité académique. Malgré les opportunités indéniables qu'offre l'IA, il est indispensable d'examiner de manière critique ses impacts potentiels sur l'inclusion numérique, l'écart technologique et les dynamiques éducatives. Cette étude, de nature exploratoire, présente diverses restrictions méthodologiques, notamment du fait qu'elle repose sur une seule entrevue. Aussi, nous n'avons pas pu dégager des indicateurs de mesure de performance à l'UCT.

Références bibliographiques

Etzkowitz, H., & Leydesdorff, L. (2000). The dynamics of innovation : From national systems and "Mode 2" to a triple helix of university–industry–government relations. *Research Policy*, 29(2), 109–123.
[https://doi.org/10.1016/S0048-7333\(99\)00055-4](https://doi.org/10.1016/S0048-7333(99)00055-4).

Freeman, R. E. (1984). *Strategic management : A stakeholder approach*. Pitman Publishing.

Latour, B. (2006). Le prince : machines et machinations. In M. Akrich, M. Callon, & B. Latour (Eds.), *Sociologie de la traduction. Textes fondateurs* (pp. 87–107). Presses des Mines de Paris.