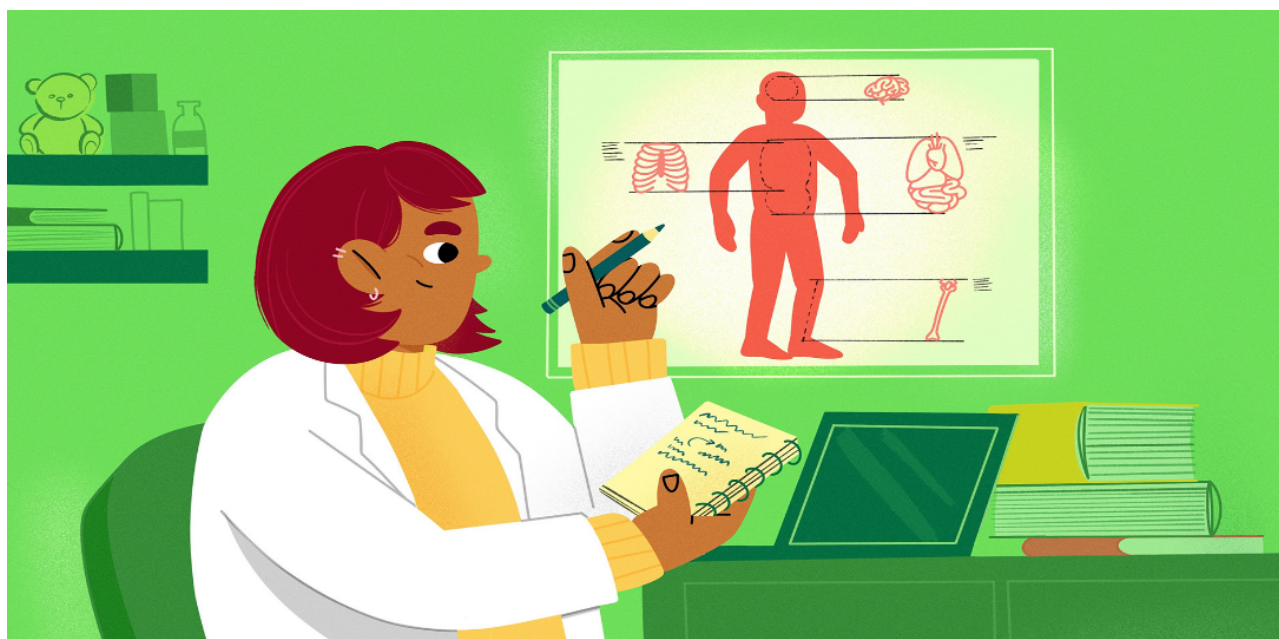




ATHÉNA : UN MODÈLE INFORMATIQUE RÉALISTE D'UNE ENFANT

Georgios Ntolkeras^{1,2*}, Hongbae Jeong³, Lilla Zöllei⁴, Adam A. Dmytriw^{5,6}, Michael H. Lev⁵, P. Ellen Grant² et Giorgio Bonmassar⁴

¹ Département de Neurologie, Hôpital d'enfants de Boston, Faculté de Médecine de Harvard, Boston, MA, Etats Unis

² Unité de Médecine Néonatale, Centre de Neuro-imagerie fœtale et néonatale et des Sciences du développement, Hôpital d'enfants de Boston, Faculté de Médecine de Harvard, Boston, MA, Etats Unis

³ Institut National de la Santé Mentale (NIH), Bethesda, MD, Etats Unis

⁴ Département de Radiologie, Centre Athinoula A. Martinos pour l'Imagerie Biomédicale, Hôpital Général du Massachusetts, Faculté de Médecine de Harvard, Boston, MA, Etats Unis

⁵ Hôpital Général du Massachusetts, Faculté de Médecine de Harvard, Boston, MA, Etats Unis

⁶ Unité de Neurochirurgie, Hôpital St. Michael, Toronto, ON, Canada

T'es-tu déjà demandé comment les médecins et les scientifiques testent de nouveaux dispositifs médicaux ou étudient le fonctionnement du corps humain ? Ils utilisent souvent des modèles informatiques, sortes de poupées numériques qui simulent le corps humain. Mais savais-tu qu'il n'existe que peu de modèles informatiques d'enfants, en particulier de filles ? C'est là qu'intervient Athéna. Athéna est un tout nouveau modèle informatique du corps d'une fillette de 3 ans et demi en bonne santé, réalisé à partir de photos réelles de son cerveau et de ses organes. Des médecins ont même vérifié l'exactitude du modèle. Athéna est si détaillée qu'elle comporte 267 parties, dont 50 éléments de son cerveau. Les scientifiques peuvent utiliser Athéna pour tester la sécurité de nouveaux dispositifs médicaux ou pour étudier comment l'électricité affecte le corps des enfants, par exemple. Et surtout, l'utilisation d'Athéna sera gratuite pour tout le monde ! Alors, fais connaissance avec Athéna et découvre ce que nous pouvons apprendre d'extraordinaire sur le corps humain !

EXPÉRIMENTER SUR DES HUMAINS VIRTUELS

MODÈLE INFORMATIQUE.

Un modèle informatique est comme un personnage qui vit dans un jeu vidéo. Il peut être utilisé pour faire des expériences sur un ordinateur avant de les essayer dans le monde réel.

ÉLECTRICITÉ. Forme d'énergie résultant du mouvement de minuscules particules appelées électrons. Elle alimente nos appareils et peut créer de la lumière, de la chaleur et du son.

MAGNÉTISME. Force naturelle produite par certains matériaux. Elle attire ou repousse d'autres objets et peut faire en sorte que certains métaux se collent les uns aux autres ou se déplacent sans se toucher.

SYSTÈME IMMUNITAIRE.

Réseau complexe de cellules, de tissus et d'organes qui aident l'organisme à combattre les corps étrangers (par exemple les micro-organismes) qui le contaminent.

T'es-tu déjà demandé comment les scientifiques étudient et résolvent des problèmes complexes sans faire d'expériences sur des personnes ou des animaux réels ? Ils utilisent souvent une technique puissante appelée **modèle informatique**. Un modèle informatique est basé sur des données stockées dans un ordinateur et aide les scientifiques à comprendre les choses en leur permettant de faire des tests dans un environnement virtuel avant de les essayer dans la vie réelle. Imagine que tu joues à un jeu sur ordinateur dans lequel tu incarnes un scientifique. Tu peux créer des êtres humains virtuels et étudier le fonctionnement de leur corps, sans avoir à effectuer de tests sur des personnes réelles.

Les modèles informatiques peuvent aider les scientifiques pour toutes sortes de choses qu'il est difficile ou impossible de tester sur des personnes. Par exemple, ils peuvent aider les scientifiques à comprendre les effets de l'**électricité** sur le corps, comme dans le cas d'un choc électrique. Les modèles informatiques peuvent également aider les scientifiques à tester la sécurité des nouvelles voitures, en utilisant des modèles qui ressemblent à des personnes lors d'accidents. Ils peuvent également nous aider à étudier comment le **magnétisme** (la force qui fait tourner l'aiguille de la boussole pour indiquer la direction du nord) affecte le corps, ou comment notre corps réagit aux implants médicaux, tels que les matériaux ou les dispositifs qui aident le corps à mieux fonctionner lorsqu'il est malade ou blessé.

Notre équipe de recherche a remarqué que la plupart des modèles informatiques d'êtres humains étaient basés sur des adultes. Nous avons donc développé un modèle informatique réaliste d'une petite fille de 3 ans ½.

LES ENFANTS SONT-ILS DE PETITS ADULTES ?

Il est important d'avoir des modèles informatiques de jeunes enfants car les enfants ne sont pas comme des adultes. Mais quelles sont les différences ?

Tout d'abord, as-tu remarqué que la tête d'un nouveau-né semble plus grosse par rapport à son corps que celle d'un adulte (**Figure 1**) ? Cela s'explique par le fait que la tête doit accueillir le cerveau, qui se développe plus rapidement au début de la vie, et que le reste du corps rattrape plus tard. Mais ce n'est pas seulement la taille de la tête qui distingue les enfants. Les enfants ont des organes que les adultes n'ont pas. Par exemple, le thymus est un élément important du système immunitaire qui aide à protéger l'organisme contre des infections telles qu'un rhume ou une otite. Au fur et à mesure que les enfants deviennent adultes et que le **système immunitaire** parvient à maturité, le thymus devient progressivement plus petit et moins actif. Les

PLAQUE DE CROISSANCE.

Partie d'un os long au niveau de laquelle a lieu la croissance de l'os.

enfants sont également en pleine croissance. T'es-tu déjà demandé comment tes os s'allongent ou comment tu grandis avec le temps ? Les enfants ont dans leurs os ce que l'on appelle des **plaques de croissance**, qui sont des zones de tissu mou appelées cartilage et permettent aux os de grandir. Chez l'adulte, ces plaques de croissance se transforment en os solide. Ces différences (et d'autres encore !) entre les enfants et les adultes montrent pourquoi nous ne pouvons pas nous contenter de rétrécir des modèles informatiques d'adultes pour créer des modèles d'enfants. Chaque partie du corps grandit et se modifie de manière unique au fur et à mesure que nous vieillissons [1].

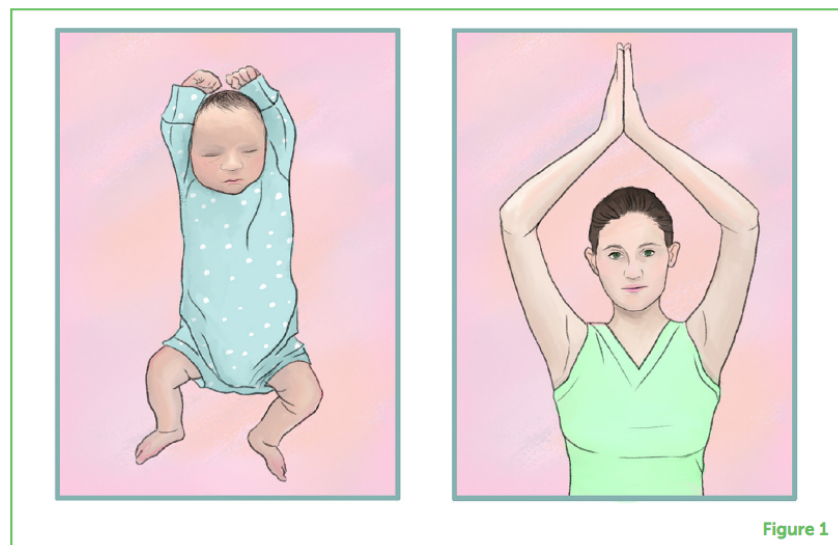


Figure 1. Avec l'âge, les parties du corps changent à des rythmes différents. Par exemple, les nouveau-nés ont une grosse tête par rapport au reste de leur corps. Les bébés ne peuvent généralement pas fermer leurs mains au-dessus de leur tête, mais les adultes peuvent facilement le faire, car leurs bras sont plus longs et leur tête moins large que leur corps. Parmi les autres différences entre les enfants et les adultes, on peut citer les organes que les enfants possèdent et que les adultes n'ont pas, comme le thymus, et le fait que les enfants deviennent plus grands avec le temps grâce à une partie spéciale de leurs os, la plaque de croissance, alors que les adultes restent à la même taille.

La croissance et le développement des garçons et des filles sont également différents. Les médecins utilisent même des courbes de croissance différentes pour évaluer la croissance des garçons et des filles, car les enfants de sexe masculin et féminin grandissent différemment en termes de poids, de taille et de périmètre crânien. Comme tu le sais, les organes génitaux de chaque sexe sont également différents. Il est donc important de disposer de modèles informatiques masculins et féminins, car des modèles distincts sont nécessaires pour refléter avec précision ces différences et s'assurer que tout le monde reste en bonne santé. C'est pourquoi nous avons d'abord développé Martin, un modèle informatique masculin pour les tout-petits, puis Athéna, un modèle féminin pour les tout-petits [2, 3].

IRM : IMAGERIE PAR RÉSONANCE

MAGNÉTIQUE. Technique d'imagerie médicale qui utilise le magnétisme pour prendre des photos très précises de notre corps. L'appareil ressemble à un gros beignet.

TOMOGRAPHIE ASSISTÉE PAR ORDINATEUR.

Technique d'imagerie médicale qui utilise les rayons X pour prendre des photos détaillées de notre corps grâce à une machine (appelée CT scan) qui ressemble à un gros beignet.

RAYONS X. C'est un type de lumière puissante et invisible qui peut traverser notre corps, permettant aux médecins de voir nos os et nos organes internes.

NEURORADIOLOGUES.

Médecins spécialisés dans l'examen d'images détaillées du corps des personnes, y compris des enfants, et en particulier de leur système nerveux, de leur cerveau, de leur colonne vertébrale et d'autres nerfs.

TROIS-DIMENSIONS (3D).

Les trois dimensions font référence à la façon dont nous décrivons les objets : longueur, largeur et hauteur. Elles nous aident à comprendre comment les choses existent et interagissent dans l'espace, comme un monde virtuel que tu peux explorer !

TISSU BIOLOGIQUE.

Ensemble de cellules semblables et de même origine.

LA CRÉATION D'ATHÉNA

Pour créer Athéna, nous avons d'abord trouvé une petite fille de 3 ans et demi au corps sain. Des photos spéciales de son corps ont été prises à l'aide de deux techniques. Certaines des photos ont été prises à l'aide de l'**imagerie par résonance magnétique (IRM)** pour créer des images détaillées de l'intérieur d'une personne. L'IRM nous permet de voir des éléments tels que le cerveau, les muscles et les organes (**Figure 2**). Nous avons également utilisé la **tomographie assistée par ordinateur** (CT scan), une technique qui utilise une machine à **rayons X** spéciale prenant de nombreuses photos sous différents angles. Elle nous permet de voir les os et d'autres parties du corps dans les moindres détails. Des médecins spécialisés, en particulier des **neuroradiologues**, ont vérifié toutes les images et ont déclaré que tout leur semblait parfait.

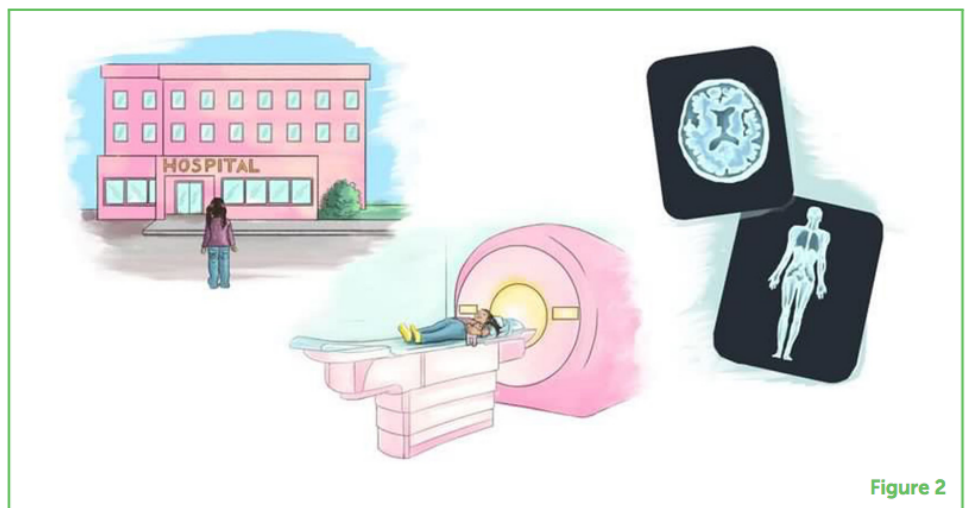


Figure 2

Figure 2. Athéna est basée sur de nombreuses images prises sur une enfant de sexe féminin en bonne santé. Certaines de ces images ont été prises à l'aide d'un scanner IRM, qui ressemble à un gros beignet et utilise de puissants aimants pour créer des images détaillées de l'ensemble du corps, y compris du cerveau.

Ensuite, à l'aide d'un ordinateur, nous avons utilisé ces images pour dessiner toutes les parties du corps d'Athéna. Nous avons accordé une attention particulière au cerveau. À la fin du processus, un médecin spécialiste du corps des enfants s'est joint à notre équipe pour procéder à des ajustements particuliers. Pour nous assurer que le modèle informatique obtenu était exact, nous avons demandé à plusieurs médecins de confirmer que tout correspondait parfaitement. Après tout ce travail, nous avons pu voir le corps d'Athéna en **trois dimensions (3D)** sur l'ordinateur.

NOUS TE PRÉSENTONS ATHÉNA !

Dans ce modèle informatique (**Figure 3**), tu peux voir le cerveau d'Athéna avec 50 **tissus** différents, son crâne et le reste des os de son corps qui l'aident à tenir debout et à bouger.

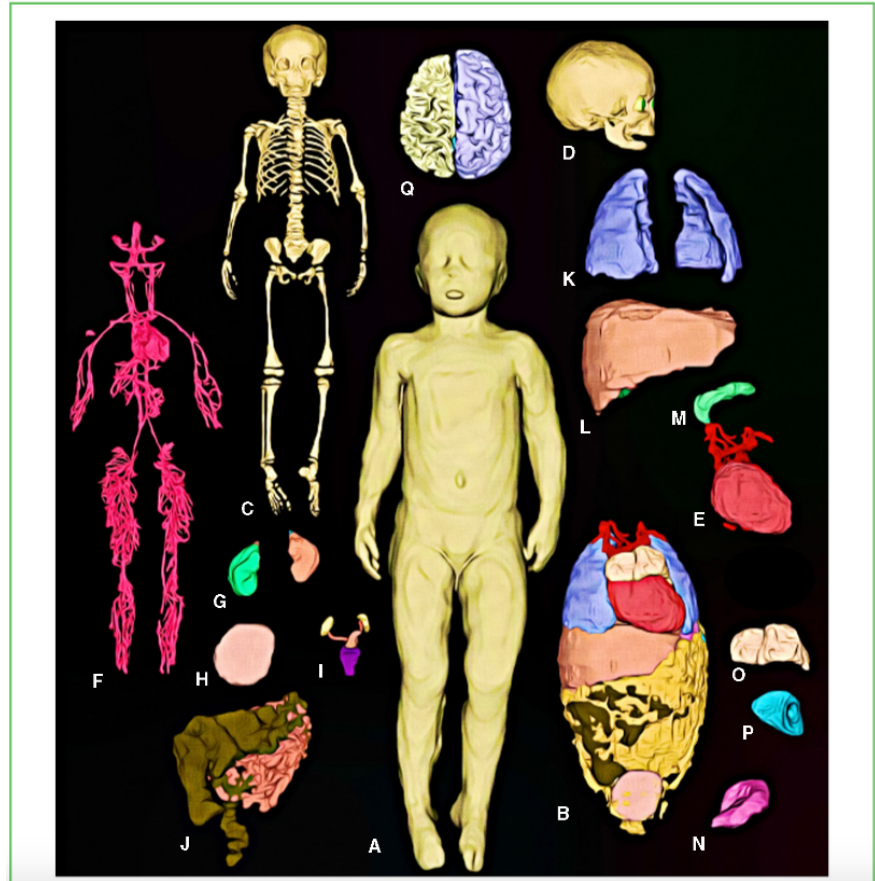


Figure 3. En utilisant notre modèle informatique, que nous avons appelé Athéna, tu peux voir : (A) la peau ; (B) les organes ; (C) les os ; (D) le crâne ; (E) le cœur ; (F) les vaisseaux sanguins ; (G) les reins ; (H) la vessie ; (I) l'appareil reproducteur, y compris les ovaires, l'utérus, le col de l'utérus et les trompes de Fallope ; (J) l'intestin ; (K) les poumons ; (L) le foie ; (M) le pancréas ; (N) l'estomac ; (O) le thymus ; (P) la rate ; et (Q) le cerveau.

Tu peux aussi voir le cœur et les vaisseaux qui transportent le sang aux organes, ainsi que la tête, les bras et les jambes de l'enfant. Tu peux voir les poumons dans la poitrine et, dans l'abdomen, les organes qui l'aident à digérer et à absorber les aliments : l'estomac, le foie, la vésicule biliaire, le pancréas, le gros intestin et l'intestin grêle. Les reins, qui produisent l'urine et aident à nettoyer le sang, font également partie du modèle, tout comme les glandes surrénales qui se trouvent au-dessus des reins, la vessie urinaire qui stocke l'urine, la graisse intra-abdominale qui stocke des sources d'énergie et la rate qui aide à lutter contre les infections. Enfin, on peut voir les organes génitaux féminins avec les ovaires, les trompes de Fallope, l'utérus et le vagin [4].

Au total, Athéna compte plus de 260 tissus différents, ce qui donne aux scientifiques une grande flexibilité pour leurs simulations et leurs expériences. Et surtout, l'utilisation d'Athéna sera gratuite pour tous !

CONCLUSION

En bref, nous avons développé Athéna, un modèle informatique très

détaillé et similaire à de vrais enfants, qui peut être utilisé dans des expériences avant d'essayer de nouvelles choses sur des humains. Nous avons fait cela parce qu'il n'y avait pas beaucoup de modèles informatiques pour les enfants, et en particulier pour les filles. Nous avons également veillé à ce que l'accès à ce modèle informatique soit ouvert, afin que tous ceux qui le souhaitent puissent l'obtenir. Athéna peut être utilisée pour différentes expériences, par exemple pour rendre les voitures plus sûres en cas d'accident ou pour aider les enfants malades en testant de nouveaux dispositifs médicaux conçus pour les aider à guérir.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier Anna Chocholi, graphiste, pour les magnifiques figures qu'elle nous a aidés à concevoir. La recherche a été soutenue par le National Institute of Health et le National Institute of Biomedical Imaging and Bioengineering NIH/NIBIB dans le cadre de la subvention R01EB024343.

ARTICLE SOURCE ORIGINAL

Ntolkeras, G., Jeong, H., Zöllei, L., Dmytriw, A. A., Purvaziri, A., Lev, M. H., et al. 2023. A high-resolution pediatric female whole-body numerical model with comparison to a male model. *Phys. Med. Biol.* 68. doi: 10.1088/1361-6560/aca950

RÉFÉRENCES

- [1] Chang, H. P., Kim, S. J., Wu, D., Shah, K., and Shah, D. K. 2021. Age-related changes in pediatric physiology: quantitative analysis of organ weights and blood flows: age-related changes in pediatric physiology. *AAPS J.* 23:1–15. doi: 10.1208/s12248-021-00581-1
- [2] Jeong, H., Ntolkeras, G., Alhilani, M., Atefi, S. R., Zöllei, L., Fujimoto, K., et al. 2021. Development, validation, and pilot MRI safety study of a high-resolution, open source, whole body pediatric numerical simulation model. *PLoS ONE.* 16:1. doi: 10.1371/journal.pone.0241682
- [3] Ntolkeras, G., Jeong, H., Zöllei, L., Dmytriw, A. A., Purvaziri, A., Lev, M. H., et al. 2023. A high-resolution pediatric female whole-body numerical model with comparison to a male model. *Phys. Med. Biol.* 68:2. doi: 10.1088/1361-6560/aca950
- [4] *Knowledge Encyclopedia Human Body!* 2017. Houston, TX: D.K. Smithsonian Institution. p. 208.

VERSION FRANÇAISE

Cet article d'accès libre est une traduction avec modifications d'un article publié par Frontiers for Young Minds (doi: 10.3389/frym.2024.1254326 ; Ntolkeras G, Jeong H, Zöllei L, Dmytriw

AA, Lev MH, Grant PE and Bonmassar G (2024) Meet Athena: A Realistic Computer Model of a Child. *Front. Young Minds*. 12:1254326).

TRADUCTION : Nicole Pasteur, Association Jeunes Francophones et la Science

ÉDITION : Catherine Braun-Breton, Association Jeunes Francophones et la Science

MENTORS SCIENTIFIQUES : Marie Péquignot, Catherine Braun-Breton, Christèle Horeau

JEUNES ÉDITEURS :

YAN, RIADE, MAYA, MARIA, NADIA, KYNAIS, KAÏS, SOFIA, JUDITH, MARWAN, MARGOT, NOÉ, SOUFIANE, ROBIN, MOHAMED-AMINE, 11-12 ANS

Nous sommes des collégiens en classe de sixième au collège du Jeu de Mail à Montpellier. Nous aimons peindre, danser, jouer au foot, faire du sport (foot, handball, gymnastique, escalade...), lire, écouter de la musique, les sciences, les jeux vidéo, le chocolat, la pizza, le couscous, voyager, nos animaux de compagnie et passer du temps avec les amis et en famille.

ARTICLE ORIGINAL (VERSION ANGLAISE)

SOUMIS le 6 juillet 2023; **ACCEPTÉ** le 22 janvier 2024

PUBLIÉ en ligne le 15 février 2024.

ÉDITION : Sara Busatto

MENTOR SCIENTIFIQUE : Jian Wang

CITATION : Ntolkeras G, Jeong H, Zöllei L, Dmytriw AA, Lev MH, Grant PE and Bonmassar G (2024) Meet Athena: A Realistic Computer Model of a Child. *Front. Young Minds*. 12:1254326. doi: 10.3389/frym.2024.1254326

DÉCLARATION DE CONFLIT D'INTÉRÊT

Les auteurs déclarent que les travaux de recherche ont été menés en l'absence de toute relation commerciale ou financière pouvant être interprétée comme un conflit d'intérêt potentiel.

DROITS D'AUTEURS

Copyright © 2024 Ntolkeras, Jeong, Zöllei, Dmytriw, Lev, Grant and Bonmassar

Cet article en libre accès est distribué conformément aux conditions de la licence Creative Commons Attribution (CC BY). Son utilisation, distribution ou reproduction sont autorisées, à condition que les auteurs d'origine et les détenteurs du droit d'auteur soient crédités et que la publication originale dans cette revue soit citée conformément aux pratiques académiques courantes. Toute utilisation, distribution ou reproduction non conforme à ces conditions est interdite.

JEUNES EXAMINATEURS

SAROJINI, REVATI, AYESHA, 8–15 ANS

Sarojini et Revati, deux sœurs, partagent une passion commune pour les dispositifs médicaux et les soins de santé. Leur curiosité et leur volonté de comprendre ces sujets se sont révélées lors de l'examen de cet article. Il est évident qu'elles ont un véritable intérêt pour le monde complexe de la technologie médicale. Ayesha, quant à elle, apporte à l'équipe un ensemble de compétences uniques. Son expérience de la programmation pour enfants, en particulier avec le langage Python, ajoute un élément dynamique au groupe. Cet ensemble de compétences diverses ne met pas seulement en valeur ses capacités techniques, mais enrichit également la perspective globale de l'équipe d'examen.

AUTEURS

GEORGIOS NTOLKERAS

Georgios Ntolkeras a obtenu son doctorat en médecine à l'Université de Thessalie, Larisa, Grèce, en 2017. Depuis le printemps 2019, il fait un postdoctorat en médecine clinique au Centre de Neuroimagerie Fœto-néonatal et de Sciences du Développement, de l'Hôpital pour enfants de Boston, Faculté de Médecine de Harvard. Il y est actuellement résident en neurologie de l'enfant et en médecine du développement neurologique, après avoir terminé sa formation de résident en pédiatrie au Centre Médical Baystate, à l'Université du Massachusetts. *gntolkeras@gmail.com

HONGBAE JEONG

Hongbae Jeong a travaillé comme chercheur au Centre Athinoula A. Martinos pour l'imagerie biomédicale au Massachusetts General Hospital. Ses projets portaient sur la sécurité IRM des dispositifs médicaux implantables.

LILLA ZÖLLEI

Lilla Zöllei a obtenu une licence en informatique et en mathématiques au Mount Holyoke College en 1999 et a terminé son doctorat en informatique au Massachusetts Institute of Technology en 2006, travaillant dans le groupe d'imagerie médicale du Dr Eric Grimson. Elle a passé un an à l'École centrale de Paris, en France, en tant qu'étudiante postdoctorale, avant de revenir à Boston. Elle est actuellement professeure associée au Département de radiologie de la Faculté de Médecine de Harvard et de l'Hôpital Général du Massachusetts. Ses recherches scientifiques portent sur l'imagerie IRM pédiatrique et le développement d'outils informatiques permettant d'explorer les aspects dynamiques du développement neurologique néonatal.

ADAM A. DMYTRIW

Adam A. Dmytriw a suivi une formation en immunologie intégrée au Département Nuffield de Sciences Chirurgicales de l'Université d'Oxford, puis il a étudié la médecine à la Faculté de Médecine Dalhousie et au Département d'imagerie médicale de l'Université de Toronto. Il a ensuite effectué des recherches à l'Institut de Recherches Krembil, à l'Hôpital Ouest de Toronto Western et à l'Institut de l'anévrisme cérébral, au Centre Médical des diaconesses Beth Israel. Il s'intéresse tout particulièrement à la neuroimmunologie et aux essais multicentriques sur les maladies cérébrovasculaires, et il a poursuivi ses travaux sur la neurointervention à l'Hôpital Brigham & Women et à l'Hôpital Général du Massachusetts, ainsi que sur l'épidémiologie clinique à l'université de Harvard.

MICHAEL H. LEV

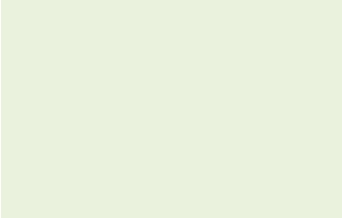
Michael Lev est professeur de radiologie et Directeur des urgences à l'Hôpital Général du Massachusetts (MGH) et à la Faculté de Médecine de Harvard. Il est neuroradiologue au MGH depuis 1995 et est certifié en médecine interne, radiologie et neuroradiologie. Il a été rédacteur en chef adjoint pour la neuroimagerie dans la revue *Radiology* de 2007 à 2009 et continue d'en être rédacteur en chef adjoint en tant que consultant spécial. Il a fait partie du comité de rédaction de l'*American Journal of Neuroradiology* de 2000 à 2020. Il est membre élu de l'American Heart Association et de l'American College of Radiology.

P. ELLEN GRANT

P. Ellen Grant est titulaire d'une licence et d'une maîtrise en physique et d'un diplôme de médecine de l'Université de Toronto, ON, Canada. Elle a fait son internat à l'Hôpital St. Paul, Vancouver, BC, Canada, et sa résidence en radiologie à l'Hôpital général de Vancouver. Elle a suivi une formation en neuroradiologie à l'Université de Californie, San Francisco, CA, États-Unis. Elle est neuroradiologue, professeure de pédiatrie (avec le titre de « Käthe Beutler MD Harvard Professor of Pediatrics ») et professeure de radiologie à la Faculté de Médecine de Harvard. Elle est également directrice des affaires professorales en radiologie, directrice de la recherche pour le Centre de soins maternels et fœtaux et directrice fondatrice du Centre de Neuro-imagerie fœtale et néonatale et des Sciences du développement, à l'Hôpital pour enfants de Boston, MA, USA.

GIORGIO BONMASSAR

Giorgio Bonmassar est né à Milan, en Italie, le 13 mai 1962. Il a obtenu un diplôme en génie électrique à l'Université de Rome "La Sapienza", (Rome, Italie) en 1989, et un doctorat en génie biomédical à l'Université de Boston (Boston, MA, États-Unis) en 1997. Il a travaillé sur les réseaux téléphoniques en tant qu'ingénieur en Recherche et Développement de systèmes chez Ericsson. Il a été assistant à l'Hôpital Général du



Massachusetts, à Boston, où il est devenu professeur adjoint. Depuis 2017, il est professeur associé en radiologie et travaille à la sécurisation des appareils d'imagerie par résonance magnétique, en particulier pour les enfants.