

Note technique :

L'information numérique sur la santé numérique pour la stratégie de santé numérique de Gavi : Intelligence artificielle et Apprentissage automatique pour la vaccination

Par Emeka Chukwu, Erica Layer, Patricia Mechael



Résumé Exécutif

Dans le cadre de ses efforts pour renforcer la stratégie d'information en santé numérique vers une stratégie plus large de santé numérique, Gavi, l'Alliance du Vaccin, a souligné la nécessité de documenter l'état actuel de l'intelligence artificielle (IA) et de l'apprentissage automatique (AA) ou IA/AA pour la planification, la prestation, la gestion de la chaîne d'approvisionnement, la communication sociale, et la surveillance des services de vaccination. Cette note technique vise à fournir un cadre que Gavi et les parties prenantes peuvent utiliser pour aider les pays à prioriser l'IA/AA pour l'engagement et l'investissement. L'intégration de l'IA/AA dans les programmes de vaccination présente un potentiel transformateur qui peut bénéficier à une plus large gamme de soins de santé primaires.

Les possibilités ne font que commencer à être explorées et comportent à la fois des opportunités significatives et des risques potentiels qu'il faut anticiper et atténuer. Les opportunités incluent l'amélioration de l'équité grâce à l'identification plus systématique des lacunes dans la couverture des services de vaccination, l'optimisation des stratégies et des emplacements de prestation de services, et l'automatisation des alertes et rappels pour que les individus et les soignants reçoivent une vaccination en temps opportun. Elles incluent également la capacité de soutenir systématiquement les agents de santé et les individus avec une assistance décisionnelle via des assistants virtuels ou des chatbots. Les risques sont principalement regroupés en biais algorithmiques, biais de données et dépendance à des données de mauvaise qualité. Le résultat est une généralisation et une pertinence médiocres des algorithmes développés aux États-Unis et ailleurs pour les systèmes de santé des pays à revenu faible et intermédiaire, en particulier dans les pays soutenus par Gavi. Des biais potentiels supplémentaires peuvent exister dans les ensembles de données des pays les plus à risque que Gavi cherche à atteindre avec les services de vaccination. Un effort considérable est également nécessaire pour tester et valider les résultats afin d'assurer précision, pertinence et équité. En outre, la gestion par l'humain pour la responsabilité, la gestion des erreurs et la rectification est une discipline souvent négligée mais cruciale pour l'IA.

L'IA, englobant une gamme de technologies telles que le traitement du langage naturel et l'IA générative (GenAI), peut automatiser l'identification des tendances, faciliter les analyses prédictives et soutenir la prise de décision basée sur les données. Elle peut également simplifier l'analyse et la synthèse de grands volumes de données qualitatives. Les études de cas et les efforts de recherche illustrent les expérimentations précoces dans diverses applications de l'IA dans la vaccination. De l'élaboration de modèles d'apprentissage automatique pour prédire la demande de vaccins et l'optimisation des routes à l'utilisation de technologies géospatiales pour la microplanification, le rôle de l'IA s'étend. Bien que ces cas d'utilisation soient largement basés sur des enquêtes ménagères et des données géospatiales, il existe des opportunités croissantes pour des applications plus larges tirant parti des données opérationnelles des systèmes d'information de santé utilisés pour soutenir la chaîne

d'approvisionnement de routine et les campagnes de vaccination. Dans le domaine de la santé plus large, des recherches pertinentes montrent que les algorithmes d'apprentissage automatique ont été utilisés pour classer les médicaments, prédire avec succès les résultats de santé fœtale et identifier les schémas récurrents des maladies à partir de dossiers médicaux non structurés. Ces approches peuvent être soigneusement adaptées et testées pour améliorer les programmes de vaccination. Les facteurs de réussite nécessaires à une adoption réussie incluent des politiques de données et une gouvernance de soutien, avec des orientations sur ce que l'IA peut et ne peut pas être utilisée, y compris des considérations éthiques appropriées, notamment pour les données des enfants. La disponibilité de données de haute qualité et représentatives, une infrastructure numérique solide, l'interopérabilité et la collaboration multi-parties prenantes sont importantes pour la mise en œuvre réussie de l'IA dans la vaccination.

Cette note technique de Gavi sur la santé numérique présente un examen semi-systématique et une analyse de la littérature publiée et des rapports de mise en œuvre, complétés par des connaissances et expériences d'informateurs clés sur les applications, les avantages et les risques de l'IA/AA pour les programmes de vaccination. Elle met en évidence leur capacité à améliorer la couverture vaccinale, optimiser les chaînes d'approvisionnement et prédire les épidémies, tout en discutant des risques potentiels qui doivent être abordés. Les recommandations suivantes visent à guider l'investissement dans l'IA/AA pour la vaccination dans les programmes de Gavi.

Recommandations Clés

- Promouvoir la génération de **données pertinentes et applicables de haute qualité en volumes adéquats** dans les initiatives d'informations sur la santé numérique soutenues par Gavi, les recherches et les enquêtes comme précurseur fondamental à l'investissement dans l'IA/AA.
- Soutenir les pays de Gavi pour **établir une gouvernance des données et une infrastructure de soutien pour tirer parti du potentiel offert** par l'IA/AA dans les domaines de l'optimisation des services et des ressources de vaccination, de la surveillance de la prestation de services, de la surveillance des épidémies et de la distribution et de la supervision des ressources humaines.
- **Évaluer les interventions existantes en matière d'IA/AA pour la vaccination**, y compris les applications utilisant les données des enquêtes ménagères, les prévisions et prédictions de la chaîne d'approvisionnement, et les chatbots pour déterminer l'impact sur la couverture et la demande, l'efficacité et l'équité, y compris la documentation systématique des biais potentiels.
- Soutenir les pays prioritaires de Gavi avec **un soutien catalytique à travers les membres de l'Alliance Gavi ou d'autres partenaires** pour l'adaptation systématique, le test et les audits d'équité des cas d'utilisation prioritaires de l'IA/AA pour la vaccination en utilisant des enquêtes ménagères, des données de chaîne d'approvisionnement, des données géospatiales et des chatbots conversationnels.

- Soutenir les pays de Gavi pour **expérimenter, évaluer et mettre en œuvre des systèmes d'IA/AA en utilisant des données opérationnelles/administratives** des systèmes d'information en santé numérique et d'autres interventions de santé numérique pour la prestation de services de vaccination grâce à des approches avec l'humain dans la boucle.
- **Augmenter le plaidoyer** auprès des pays soutenus par Gavi pour prioriser les facteurs facilitateurs essentiels à l'application de l'IA/AA (par exemple, infrastructure, littératie et réglementation équitable, toutes nécessaires pour collecter des données de qualité sur la vaccination).
- Développer une politique interne de Gavi (par exemple, un code de conduite pour l'IA) qui guide **l'application éthique et responsable de l'IA** pour la vaccination et d'autres programmes de santé.

Contexte

Présentation de l'intelligence artificielle et de l'apprentissage automatique

Ces dernières années, la montée de l'intelligence artificielle générative (Gen AI) avec le lancement récent de ChatGPT par OpenAI a mis en lumière le pouvoir révolutionnaire de l'apprentissage automatique (AA) et de l'intelligence artificielle (IA) dans de nombreux secteurs, y compris la santé. L'intelligence artificielle (IA) est un vaste domaine à l'intersection des sciences informatiques et statistiques qui traite de la création d'agents intelligents utilisant des algorithmes informatiques (Columbia Engineering 2024) (Weng 2015). Les agents intelligents apprennent, raisonnent et agissent de manière autonome. Les algorithmes sont un ensemble de règles, de procédures ou d'instructions pour résoudre un problème en un nombre fini d'étapes (Hill 2016). L'apprentissage automatique (AA) est la façon dont les algorithmes d'IA sont développés pour apprendre et déduire et conclure à partir des données sans être explicitement configurés (Bi et al. 2019). La forme la plus populaire d'IA dans la santé est les assistants virtuels, qui relèvent du traitement du langage naturel et qui aident à générer des textes de base ou des recommandations basiques (Hall et al. 2022). Les grands modèles de langage (LLM) sont des technologies de traitement du langage naturel avancées capables de traiter des textes de manière humaine en fonction de la formation reçue à partir de vastes bases de données d'informations linguistiques comme les Transformateurs génératifs pré-entraînés (GPT) (Yao et al. 2024). L'application de l'IA qui permet de générer divers types de contenu - texte, image, audio, vidéo et autres formes de données synthétiques - est appelée IA générative (GenAI) (IBM Research 2024) (García-Peñalvo & Vázquez-Ingelmo 2023). En tirant parti de l'IA, il peut être possible de résoudre certains défis des programmes de santé, en fournissant des informations plus opportunes, précises et exploitables pour de meilleurs résultats de santé (Jiang et al. 2017). Les systèmes d'IA eux-mêmes dépendent de données représentatives de haute qualité pour extraire des informations. Lorsqu'ils sont automatisés et appliqués à des processus d'information de routine, ils peuvent aider à atténuer les problèmes de qualité introduits lors du processus de traduction/extraction

d'informations humaines. De plus, l'IA peut potentiellement améliorer la prise de décision, l'analyse, l'efficacité et la productivité, la détection des fraudes, et plus encore, mener finalement à de plus grands progrès dans la mission de vaccination.

Applications actuelles et potentielles de l'IA/AA pour la vaccination

Les programmes de vaccination bénéficient de la digitalisation. En conséquence, il y a maintenant beaucoup plus de données pouvant être exploitées pour les applications IA/AA. Cependant, il y a des considérations liées à la qualité des données et à leur représentativité qui doivent être prises en compte dans tout processus d'application. Les recherches dans d'autres domaines de la santé suggèrent que les parties prenantes de la vaccination peuvent bénéficier de l'intégration de l'IA dans leur mission d'améliorer l'accès aux vaccins et de réduire les maladies à l'échelle mondiale (Jiang et al. 2017). Bien que cela soit vrai, des considérations importantes sont nécessaires pour garantir que l'investissement dans l'IA pour les programmes de vaccination produise les résultats escomptés. L'IA peut aider à synthétiser de grandes quantités de données et à automatiser l'identification des tendances pour la prise de décision basée sur les données (Jiang et al. 2017).

Principales opportunités dans les pays soutenus par Gavi où l'IA/AA est déjà testée et/ou pourrait être applicable:

- Optimisation de la demande de vaccins et prévisions
- Identification des enfants sans dose via les établissements manqués
- Optimisation des canaux de distribution des vaccins pour un meilleur ciblage des programmes de vaccination
- Optimisation des routes d'approvisionnement en vaccins pour des livraisons efficaces et en temps opportun
- Microplanification et planification de la stratégie de vaccination
- Planification des campagnes de vaccination
- Prévision des épidémies pour informer les campagnes de vaccination ciblées
- Soutien à la formation et à la supervision non perturbatrice des programmes
- Prévision précise de la demande basée sur les données historiques de la demande et de l'offre pour éviter les pénuries ou le gaspillage de vaccins
- Gestion et synthèse des informations techniques des rapports, évaluations, publications et autres documents sous des formes accessibles

Chacune de ces opportunités ou activités a des preuves antérieures et/ou des parallèles dans d'autres domaines de la santé et est bien éligible pour une optimisation grâce à l'application ciblée de l'IA/AA pour la vaccination.

DÉFINITIONS

“**L’intelligence artificielle** est le domaine de développement d’ordinateurs et de robots capables de se comporter de manière à imiter et à dépasser les capacités humaines.” - Columbia Engineering. (2024). Artificial Intelligence (AI) vs Machine Learning. <https://ai.engineering.columbia.edu/ai-vs-machine-learning/>

Par exemple, en utilisant des ensembles de données historiques sur la distance, la capacité des camions, la durée, etc. et un ensemble de règles ou de modèles développés grâce à l’apprentissage automatique pour recommander des itinéraires optimaux pour la livraison des stocks de vaccins.

“**L’apprentissage automatique** est l’utilisation et le développement de systèmes informatiques capables d’apprendre et de s’adapter sans suivre des instructions explicites en utilisant des algorithmes et des modèles statistiques pour analyser et tirer des conclusions à partir de modèles dans les données.”

– *Oxford Language Dictionary*. (2024)

Par exemple, tester et évaluer les résultats des données sur les réactions indésirables à la vaccination en fonction des données démographiques, de la situation géographique, etc. pour observer des modèles émergents qui peuvent servir de base aux modèles d’IA.

“**L’IA générative** fait référence à des modèles d’apprentissage avancés capables de générer du texte, des images et d’autres contenus de haute qualité basés sur les données sur lesquelles ils ont été formés.”

– *IBM Research*. (2024) <https://research.ibm.com/blog/what-is-generative-AI>

Par exemple, précharger les calendriers de vaccination, charger et mettre à jour les informations avec les réponses pour mettre en place un assistant virtuel ou un chatbot pour répondre aux questions des soignants, des vaccinés, des superviseurs et des responsables du PEV.

“**La science des données** est l’étude des données pour extraire des informations significatives pour les entreprises. C’est une approche multidisciplinaire qui combine les principes et les pratiques des domaines des mathématiques, des statistiques, de l’intelligence artificielle et de l’ingénierie informatique pour analyser de grandes quantités de données.”

– *AWS*. (2024) <https://aws.amazon.com/what-is/data-science/>

Par exemple, utiliser des tableaux de bord pour afficher les taux de couverture vaccinale par rapport aux objectifs sur une carte géographique afin de surveiller les performances au cours d’une campagne de vaccination et pouvoir prendre des mesures correctives à temps.

Revue des cadres, de la littérature et des expériences

Une recherche documentaire et une analyse semi-systématique de la littérature scientifique, complétées par une recherche de littérature grise sur les sites Web des membres de l'Alliance, ont été menées [voir l'Annexe A pour plus de détails sur les méthodes, la stratégie de recherche et le diagramme PRISMA avec les résultats de la recherche et de l'analyse]. De même, une recherche a été effectuée sur les sites web des principaux membres de l'Alliance Gavi et des organisations pertinentes, comme indiqué ci-dessous, pour identifier les cas d'utilisation actuels documentés et/ou mis en œuvre par l'OMS, l'UNICEF, Gavi, l'UNFPA et l'Africa CDC. Quarante-cinq articles sur l'IA/AA pour la vaccination ou les soins de santé primaires plus larges ont été inclus et une analyse complète des textes a été utilisée pour extraire les preuves de l'application actuelle de l'IA/AA pour la vaccination et d'autres domaines des soins de santé primaires. Nous avons également examiné deux rapports sur l'IA/AA pour la santé et les applications actuelles de l'IA pour la vaccination. Les sites web de deux interventions référencées dans la littérature utilisant l'IA ont également été examinés. De même, des entretiens avec des informateurs clés ont été menés avec 15 professionnels ayant recherché, financé ou participé à des programmes et initiatives d'IA pour la santé. Les réponses ont été utilisées pour valider et compléter les résultats de la revue de la littérature.

Les preuves et exemples d'IA pour les programmes de vaccination et de soins de santé primaires dans la littérature montrent qu'il existe d'immenses efforts de recherche dans le domaine de l'IA pour la vaccination et les soins de santé. Trois thèmes principaux ont émergé de notre analyse :

1. l'utilisation de l'IA pour optimiser les systèmes de vaccination ;
2. l'amélioration de la demande de vaccins et la lutte contre la désinformation; et
3. l'amélioration de la formation des agents de santé et de la qualité de la prestation des services.

L'optimisation de la chaîne d'approvisionnement par l'utilisation de l'IA, bien que non présente dans la littérature publiée, est prometteuse.

Optimisation des systèmes : Surveillance améliorée des maladies grâce aux données d'enquête

De nombreuses études de recherche montrent que la sécurité sanitaire et la surveillance améliorée des maladies peuvent bénéficier de la surveillance des maladies activée par l'IA. Une étude au Bangladesh a utilisé les données de l'enquête démographique et de santé (BDHS) du Bangladesh de 2007, 2011 et 2018 pour prédire la prise du vaccin contre la rougeole. Dans cette étude, le vaccin contre la rougeole était la variable dépendante et les variables indépendantes incluent la résidence, l'éducation, la religion, l'indice de richesse, l'éducation du mari, le travail, le sexe de l'enfant, le sexe du chef de ménage, l'âge, le nombre de membres du ménage, l'âge de

la première naissance, le rang de naissance, les visites prénatales (Hasan et al. 2021). Les principales conclusions de cette recherche étaient qu'elle utilisait un minimum d'attributs de l'enfant et des membres de la famille pour atteindre une précision de 80 % et le code source des données est également disponible publiquement. De même, Dong et Wakefield ont utilisé des données de l'enquête démographique et de santé géoréférencée (NDHS) du Nigéria de 2018 pour modéliser la stratification et le regroupement de l'enquête afin d'améliorer les estimations de la couverture vaccinale contre la rougeole et de fournir des cartes plus précises (Dong & Wakefield 2021). Bien que les méthodes utilisées dans cette recherche soient similaires à celles utilisées pour la modélisation de l'IA, cette recherche ne précise pas clairement s'il s'agissait de modélisation de données traditionnelle ou de modélisation IA.

De plus, d'autres recherches testent et valident de nouveaux modèles d'apprentissage automatique ou existants. Par exemple, Ru et al. comparent deux algorithmes de renforcement de gradient extrême (XGBoosting) et de régression logistique pour prédire les épidémies de rougeole aux États-Unis en utilisant des données sociodémographiques, des statistiques de population, la couverture vaccinale contre la rougeole et les politiques d'exemption, l'accès aux soins de santé, le volume de voyages aériens internationaux et le pays d'origine. Ils ont utilisé des données d'enquête agrégées de 2014 et 2018 pour l'entraînement et les données d'enquête de 2019 pour les tests (Ru et al. 2023). Cela renforce davantage l'intérêt d'utiliser des données d'enquête pour la surveillance des maladies basée sur l'IA.

Une autre approche évaluée dans la littérature pour comprendre l'état de l'apprentissage automatique pour la vaccination était son utilisation pour analyser les données de l'étude des décès d'un million pour six domaines de maladies évitables par la vaccination – Pneumonie, diarrhée, paludisme, méningite, rougeole et fièvre d'origine inconnue pour déterminer la cause du décès en Inde (Idicula-Thomas et al. 2021). Ces domaines de maladies constituaient 13 216 des 18 826 décès infantiles uniques âgés de 1 à 59 mois pendant la période 2004 à 2013. Comme plus de 70% des décès étaient causés par les six maladies évitables par la vaccination, la combinaison des signes/symptômes présentés par les individus décédés a ensuite été utilisée pour diagnostiquer la cause du décès. Bien que l'autopsie verbale ait prouvé son efficacité, même pour cette étude, la classification automatisée des paramètres capturés lors de l'autopsie verbale à l'aide de l'IA améliore la classification de la cause du décès.

Ces approches de l'IA/AA s'alignent sur la priorité de Gavi de mieux tirer parti des données pour améliorer la surveillance des maladies évitables par la vaccination comme point d'entrée pour évaluer la force de la couverture des programmes de vaccination.

Optimisation des chaînes d'approvisionnement / chaînes d'approvisionnement intelligentes

L'optimisation de la chaîne d'approvisionnement est un cas d'utilisation connu pour l'IA/AA – en particulier pour l'optimisation des routes, la planification de la capacité/du volume et la classification des médicaments. Par exemple, le gouvernement indien, avec le soutien du PNUD, a mis en œuvre le Réseau électronique d'intelligence

vaccinale (eVIN), une plateforme basée sur les smartphones et le cloud pour augmenter la disponibilité des vaccins (PNUD 2024). La plateforme eVIN soutient les 733 districts des 36 États et territoires de l'Union en Inde avec près de 25 000 enregistreurs de température, aidant à atteindre une réduction de 80 % des cas de rupture de stock de vaccins. Alfred Addy a noté que l'eVIN "...utilise des algorithmes d'IA pour suivre les données en temps réel sur les stocks de vaccins, les températures de stockage et la distribution à travers le pays" (Addy 2021). Le système eVIN a été adopté en Indonésie en 2018 après son premier lancement en Inde en 2015, réduisant les ruptures de stock de vaccins de 55 % (Ong & Wee 2020). De même, Zipline utilise des algorithmes basés sur l'IA pour optimiser les routes de livraison de sang, ce qui est transférable à la vaccination.

Les informateurs indiquent également que des algorithmes ont été développés pour nettoyer les données de la planification familiale (PF) et de la santé maternelle, néonatale et infantile (SMNI). Ces applications testées au Kenya incluent une boucle humaine intégrée et pour l'approbation des données nettoyées. Les informateurs ont noté pouvoir utiliser des séries de données plus longues qu'avant l'utilisation de l'analyse et des prévisions basées sur l'IA. Les informateurs ont également déclaré que

“

les équipes étaient désormais capables de respecter les délais pour la première fois, ce qui répond au processus manuel laborieux pour améliorer les prévisions pour le renforcement de la gestion de la chaîne d'approvisionnement de la vaccination.

”

Si correctement configuré avec des données alignées sur la stratégie logicielle cible de Gavi et la stratégie des dispositifs EMS, le système de chaîne d'approvisionnement activé par l'IA peut améliorer la conformité à ces normes.

Optimisation de la localisation des services géospatiaux et microplanification

L'optimisation de la planification des services de vaccination grâce à l'utilisation des données géospatiales est l'un des cas d'utilisation les plus prioritaires car il a les plus grandes implications pour l'identification et l'atteinte des enfants sans dose. Ramos & Peramo ont développé un modèle d'apprentissage automatique pour le traitement des données, l'analyse du chemin le plus court et la catégorisation automatique de l'utilisation des terres (Ramos & Peramo 2024). Ils ont utilisé la technologie des systèmes d'information géographique (SIG) et l'intelligence artificielle (IA) pour cartographier la distribution actuelle des hôpitaux et évaluer la disponibilité spatiale des services de santé aux Philippines. La cartographie géospatiale a été définie dans les limites de la ville d'Olongapo aux Philippines en utilisant les données routières d'OpenStreetMap et QGIS. Les informateurs pensent que cela améliorera la microplanification numérique traditionnelle basée sur le SIG en utilisant les informations

provenant du niveau des établissements de santé pour informer la planification à un niveau supérieur. Un informateur a aussi indiqué que

“

...la micro-planification numérique pour identifier et surveiller la dose zéro avec des cartes d'habitation, rend ces dernières plus interactives, accessibles et aide à montrer les épidémies...

”

Un cas d'utilisation similaire est l'application des systèmes de santé basés sur l'IA pour faciliter une meilleure localisation des laboratoires. Chowdary et al. ont développé un modèle pour la localisation des laboratoires en se concentrant sur l'Inde (Chowdary et al. 2023). Les entrées incluent des estimations géospatiales, une liste de recensement des établissements, une liste de recensement des établissements de santé qui se chevauchent avec d'autres installations. Les sorties pourraient être le nombre de séances de vaccination nécessaires, les emplacements et les stratégies pour atteindre les établissements de santé. Gavi devrait explorer cela comme une zone importante d'exploration, de test, d'évaluation et d'investissement.

Demande de vaccins et lutte contre la désinformation/mésinformation

Les agents conversationnels basés sur l'IA, comme les chatbots, ont un grand potentiel pour les programmes de vaccination en fournissant des informations dans plusieurs langues. Simon et al., dans une étude pilote contrôlée randomisée, ont constaté que les chatbots basés sur l'IA aidaient à améliorer le comportement face au COVID-19 parmi une population culturellement et linguistiquement diversifiée (Baal et al. 2023). Ce cas d'utilisation peut être facilement transféré à la vaccination de routine. De plus, le programme PROMPTS en Eswatini et au Ghana a utilisé des messages SMS bidirectionnels basés sur l'IA pour atteindre plus de 2 millions de femmes enceintes avec des messages de santé vitaux (Jacaranda Health 2023). Les programmes comme celui-ci peuvent facilement être étendus à la vaccination. De même, l'intervention déployée par Reach Digital Health en Afrique du Sud utilise à la fois les SMS et WhatsApp pour atteindre des millions de mères avec des messages bidirectionnels appuyés par l'IA. Selon un informateur

“

le service fournit également un accès à un service d'assistance textuel qui reçoit plus de 20 000 demandes par mois avec plus de 1 200 demandes par jour aux heures de pointe, et l'IA facilite la résolution avec trois opérateurs du service d'assistance agissant comme le composant humain dans la boucle à la fin du flux de demandes

”

Le programme est maintenant étendu pour inclure la vaccination au Mozambique pour le suivi des rappels du calendrier de vaccination dans le cadre d'un programme plus large de messages de santé maternelle.

Ce modèle a également été largement utilisé pendant la pandémie de COVID-19 pour l'écoute sociale et la génération de la demande de vaccins, comme indiqué dans cet article de revue (Hall et al. 2022). Les données démographiques et conversationnelles ainsi que les données de tests de laboratoire peuvent également alimenter les analyses qui conduisent à des actions optimisées basées sur les données. De même, Bolongaita et al. ont développé et validé un algorithme d'apprentissage automatique pour les événements indésirables de vaccins en Éthiopie en utilisant des données de surveillance en temps réel pour surveiller les dossiers de santé électroniques pour les signes d'événements indésirables après la vaccination (Bolongaita et al. 2022). Les maladies surveillées comprennent la diarrhée à rotavirus, le papillomavirus humain (HPV), la rougeole et la pneumonie, ainsi que leurs vaccins correspondants. L'étude a révélé que les facteurs socio-économiques sont des déterminants des incidents et de la mortalité.

Ces utilisations des données opérationnelles/administratives des systèmes d'information en santé numérique et de la communication directe avec les clients avec des approches humaines dans la boucle offrent une promesse potentielle pour un meilleur ciblage des messages et des services de vaccination en temps réel dans le cadre de la priorité de Gavi de renforcer la confiance et la demande vaccinales.

Exploitation des données administratives et de prestation de services pour le soutien à la décision clinique, la priorisation de la prestation de services et la distribution des ressources humaines

L'un des domaines les plus prometteurs de l'utilisation de l'IA/AA est l'exploitation des données opérationnelles, administratives et de prestation de services pour soutenir des approches plus ciblées de soutien à la décision clinique. Bien qu'aucun document n'ait été identifié se concentrant directement sur les applications de vaccination, les applications dans le VIH fournissent des informations utiles sur la façon dont les données opérationnelles et administratives des dossiers médicaux électroniques (EMR) sont utilisées pour soutenir la prise de décision clinique. Romero et al. ont constaté que l'aide à la décision clinique par l'IA était efficace à partir d'une enquête pré-post mise en œuvre auprès des médecins dans trois cliniques de soins de santé primaires ambulatoires (Romero-Brufau et al. 2020). Au Zimbabwe, le modèle de prédiction du statut VIH a été intégré dans les dossiers médicaux électroniques pour prédire le statut VIH des hommes ayant des relations sexuelles avec des hommes (HSH) (Chingombe et al. 2022). Les données utilisées ont été collectées dans une étude de prévalence en 2018 ciblant 1 538 HSH de deux provinces du Zimbabwe. Plusieurs modèles d'apprentissage automatique ont été appliqués à ces ensembles de données, montrant l'application potentielle dans d'autres domaines de la santé clinique, y compris la vaccination.

Plusieurs informateurs clés ont également identifié le VIH/sida comme le programme ayant la plus grande application de l'IA et de l'apprentissage automatique pour le soutien à la décision clinique. Les informateurs pensent que la forte adoption de l'IA

pour le VIH est due au fait que c'est là où la plus grande adoption des investissements dans les EMR a eu lieu dans les pays à revenu faible et intermédiaire, ce qui, à son tour, rend les données disponibles pour construire et tester les modèles d'IA. Un répondant a souligné que,

“

...l'objectif de l'utilisation de l'application de l'IA est d'améliorer les résultats cliniques sur la base de la théorie du changement afin que le soutien psychosocial puisse être fourni de manière proactive pour éviter l'arrêt du traitement...

”

Les données des registres de vaccination matures comme le ZM-EIR au Sindh, Pakistan, jouent un rôle clé dans la surveillance personnalisée en appliquant l'apprentissage automatique à des millions de dossiers de santé mère-enfant (Siddiqi et al. 2021). Un autre exemple d'une telle application au niveau des soins de santé primaires peut également être trouvé dans l'étude de Kumar et al. qui a utilisé une approche d'apprentissage automatique pour modéliser la classification du risque de diabète gestationnel (Kumar et al. 2022). Le cadre de recherche portait sur 909 femmes enceintes singapouriennes vivant au Royaume-Uni.

Les aides diagnostiques utilisant la vision par ordinateur et les grands modèles de langage (LLM) offrent un grand potentiel pour les systèmes d'alerte précoce et d'autres applications de vision par ordinateur comme l'identification des éruptions cutanées (Glock et al. 2021), et les informateurs ont mis en évidence le comptage des fioles de vaccins utilisant la vision par ordinateur. Les informateurs ont indiqué que “la vision par ordinateur et les grands modèles de langage (LLM) ont été utilisés pour la supervision de soutien”. Les auto-tests

avec l'IA pour le paludisme, le VIH et le COVID sont également envisagés par certains partenaires de Gavi. Il y a des domaines auxquels cela peut s'appliquer à la vaccination, par exemple pour,

“

Déterminer si une injection a été bien inoculée pour confirmer la certitude d'une campagne de vaccination utilisant la reconnaissance d'images et basée sur la vision par ordinateur et la vision avec des grands modèles de langage.

”

De plus, des informateurs clés ont mis en évidence des pays tels que le Rwanda, l'Afrique du Sud, la RDC, la Côte d'Ivoire, l'Ouganda, le Bénin, le Nigéria, le Kenya, le Burundi, la Sierra Leone et l'Éthiopie qui expérimentent l'IA.

En outre, l'utilisation combinée des données de plusieurs sources peut soutenir l'optimisation des services de santé et la distribution des ressources humaines. En Inde, Prabhune et al. ont développé et validé un modèle d'apprentissage automatique pour un accès facile aux installations de soins de santé primaires en utilisant des données géospatiales, démographiques et d'utilisation des services de santé (Prabhune et al. 2024). Le modèle classe les villages en fonction de l'accessibilité et classe les soins de santé primaires en fonction de leur utilisation. Le modèle aide également à identifier les installations de santé sous-utilisées et sur-utilisées. Le modèle optimise avec succès l'allocation des ressources humaines en fonction de la demande, de la charge de travail et de l'accessibilité, considéré comme une approche systématique pour résoudre la pénurie de ressources humaines. Le modèle a été validé en utilisant des données de l'indice d'influence démographique du recensement de 2011, de l'indice de mortalité de l'e-Janam pour 2016 à 2019 et de l'indice de fréquentation pour tous les villages pour 2018 à 2020. Le modèle a été appliqué à 903 villages au Karnataka et à 59 centres de soins de santé primaires. Les soins de santé primaires ont été classés en charge de travail élevée et faible pour aider à l'allocation. Les méthodes ici sont importantes pour Gavi dans la résolution des pénuries de vaccination et l'optimisation et l'allocation automatique des ressources dans les zones de plus grande nécessité pour soutenir la réallocation des ressources en temps réel ou quasi-réel.

Dans la littérature, l'IA a permis l'allocation et l'optimisation des ressources humaines (Bhat et al. 2024). La formation des agents de santé avec l'aide de l'IA via la gamification ou la construction de capacités ciblées via l'information a été soulignée par quelques informateurs comme ayant un immense potentiel. Une application exemple abordera les réponses automatiques aux questions fréquemment posées (FAQ) ainsi que les chatbots. D'autres exemples portent sur la formation gamifiée des agents de santé avec l'IA. La traduction automatique des matériels de formation en un jeu avec une banque de questions aléatoires qui mènent à différentes étapes, mise en œuvre via des flux de travail, mais peut potentiellement permettre à un système d'IA de sélectionner des chemins en fonction des réponses du joueur.

Analyses prédictives des risques pour les maladies évitables par la vaccination

L'IA peut faciliter l'analyse prédictive de la demande de vaccins et des épidémies en analysant les données d'enquête. Des exemples d'une telle analyse des données d'enquête ont été utilisés au Nigéria (Dong & Wakefield 2021), au Bangladesh (Hasan et al. 2021) et en Inde (Idicula-Thomas et al. 2021). Au Bangladesh, des modèles basés sur l'IA ont été utilisés pour prédire la prise de vaccins en fonction de facteurs sociodémographiques, aidant à identifier les zones à faible couverture vaccinale et permettant des interventions ciblées (Hasan et al. 2021). De même, au Nigéria, des modèles géostatistiques bayésiens utilisant les données de l'enquête démographique et de santé ont été employés pour générer des estimations à petite échelle de la couverture vaccinale contre la rougeole, facilitant des stratégies de vaccination plus précises et efficaces (Dong & Wakefield 2021). Aux États-Unis, des approches d'apprentissage automatique ont été appliquées pour prédire les épidémies de rougeole en analysant les données sociodémographiques, la couverture vaccinale et

les politiques d'exemption. Ces modèles prédictifs aident les responsables de la santé publique à prévenir les épidémies potentielles, réduisant ainsi l'incidence des maladies évitables par la vaccination (Ru et al. 2023).

De plus, Rocha a testé les données d'enquête sur six algorithmes d'apprentissage automatique pour évaluer le risque de naissance prématurée au Brésil (Rocha et al. 2021). Cette étude populationnelle a analysé les données de 3,8 millions de mères avec des naissances vivantes réparties sur près de 4000 municipalités brésiliennes. Les variables importantes pour prédire la semaine de naissance prématurée étaient le nombre d'accouchements précédents par césarienne, le nombre de consultations prénatales, l'âge de la mère, la disponibilité de l'échographie, la proportion des équipes de soins primaires dans la municipalité.

De même, Boland et al. ont utilisé l'IA/AA pour analyser un ensemble de données de médicaments codés ICD-9 de 5 658 femmes enceintes à New York avec des anomalies congénitales (Boland et al. 2017). L'étude a pu identifier les catégories de médicaments pouvant être considérées comme nocives ou sûres. Le vaccin contre la rubéole était l'un de ceux classés comme nocifs et augmentait le risque de perte fœtale, ce que l'étude a indiqué être cohérent avec la littérature existante sur l'exposition au début de la grossesse. Cela est pertinent pour la programmation de Gavi sur les vaccins contre la rubéole et d'autres analyses de risques prioritaires.

Considérations Clés et Recommandations

Bien que la littérature sur l'application de l'IA en santé publique en général et en vaccination en particulier soit en croissance, les deux domaines les plus avancés sont l'utilisation de l'IA pour analyser les données des enquêtes de ménages ou autres enquêtes de santé et l'utilisation de l'IA pour la microplanification. Tous les autres domaines en sont encore aux stades d'expérimentation, de pilote ou de test. Il existe peu de preuves dans la recherche et la littérature académiques sur la mise en œuvre actuelle de l'IA pour la santé et pour la vaccination. Les informations provenant des répondants montrent le potentiel croissant de l'IA/AA en santé et en vaccination. Les modèles aident à prédire les zones et les populations à risque, aidant ainsi à des campagnes de vaccination ciblées contre la rougeole (Cutts et al. 2020). Au Nigéria, l'évaluation de l'efficacité-coût de l'utilisation des données des consommables, de la main-d'œuvre directe, de la main-d'œuvre indirecte, de l'infrastructure de la chaîne d'approvisionnement et des groupes de coûts de transport a également été réalisée (Zimmermann et al. 2019).

Globalement, l'IA a le potentiel d'influencer comment les enfants sans dose et sous-vaccinés sont identifiés et atteints, aide à une réponse rapide aux épidémies, améliore la qualité et la sécurité des vaccins, et facilite l'allocation optimisée des ressources et la supervision de soutien. Il y a également des recherches prometteuses sur l'application de l'IA pour l'aide à la décision clinique dans les dossiers de santé électroniques pour la gestion du VIH, ce qui a un potentiel d'adaptation dans les systèmes et registres d'information de vaccination électronique. Les systèmes d'aide à la décision clinique par l'IA ont montré qu'ils améliorent les soins aux patients en fournissant des recommandations basées sur des preuves en temps réel aux prestataires de soins de santé. Par exemple, des cadres d'IA ont été développés pour prédire les résultats de santé et guider les plans de traitement pour les patients atteints de VIH, ce qui peut être de la même manière appliqué pour gérer les calendriers de vaccination et surveiller la sécurité des vaccins (Romero-Brufau et al. 2020). Les recherches émergentes sur l'allocation des ressources humaines par l'IA dans les établissements de soins de santé primaires présentent également des opportunités pour les services de vaccination. Des études ont développé des modèles d'apprentissage automatique pour optimiser l'allocation des travailleurs de la santé, en s'assurant que les ressources sont efficacement réparties en fonction de la demande et des modèles d'utilisation. Ces modèles peuvent être adaptés pour optimiser le déploiement des équipes de vaccination, améliorant ainsi l'efficacité et la portée des programmes de vaccination (Bhat et al. 2024).

Facilitateurs prioritaires pour l'IA/AA

Les principaux facteurs inhibiteurs identifiés lors de l'élaboration de cette note technique incluent un écosystème de santé numérique insuffisamment mature pour soutenir les applications d'IA/AA en santé et en vaccination; une infrastructure numérique médiocre

pour collecter des données de qualité qui inhibe la disponibilité des données (par exemple, électricité, centre de serveurs et connectivité); la construction de modèles peut être intensive en données et en processeur et peu de pays disposent de centres de données.

Un rapport récent de l’OMS sur l’IA pour la santé reproductive a souligné la nécessité d’une meilleure gouvernance des données dans les programmes de santé sexuelle et reproductive (OMS 2024). Les Principes de Gouvernance des Données de Santé ont été récemment lancés avec des adhésions de plusieurs organisations de développement (Principes de Gouvernance des Données de Santé 2023). Les principes abordent la protection des individus et des communautés, la construction de la confiance dans les systèmes de données, l’assurance de la sécurité des données, la promotion des systèmes et services de santé, la promotion du partage et de l’interopérabilité des données, la facilitation de l’innovation supplémentaire en utilisant les données de santé, la promotion des avantages équitables des données de santé et l’établissement des droits et de la propriété des données. Chacun de ces huit principes a des éléments de base pour permettre l’opérationnalisation. Avant cela, il y avait d’autres cadres comme le cadre de gouvernance des données de santé de l’Organisation de Coopération et de Développement Économiques (OCDE), qui fournit des lignes directrices pour la gestion des données de santé afin d’assurer la confidentialité, la sécurité, la transparence, la responsabilité et le flux transfrontalier des données (OCDE 2017). D’autres lignes directrices générales sur les données et réglementations incluent le Règlement Général sur la Protection des Données (RGPD) européen et la loi américaine sur la portabilité et la responsabilité en matière d’assurance maladie (HIPPA). L’adressage des règles de légalité, d’équité, de transparence, de limitation de la finalité, de limitation du stockage, de responsabilité et de confidentialité, ainsi que de notification de violation. Plusieurs pays où Gavi travaille ont déjà des règlements et des lois de gouvernance des données nationales qui reflètent ces lignes directrices.

La directive de l’OMS sur les questions éthiques en matière de surveillance de la santé publique fournit des orientations éthiques pour assurer que la surveillance de la santé publique est menée de manière à respecter les droits individuels (OMS 2017). Le Code d’éthique médicale de l’American Medical Association (AMA) fournit un cadre pour que les professionnels de la santé se conduisent, y compris lors de l’utilisation de l’IA (AMA 2024). Il existe également des codes spécifiques à chaque pays de déontologie médicale qui peuvent s’appliquer.

L’alphabétisation numérique reste un défi majeur dans la plupart des pays où Gavi travaille. Cela est crucial pour les progrès de l’application de l’IA/AA à grande échelle. De plus, peu de politiques et de réglementations (garde-fous) sont disponibles pour gérer l’IA dans la plupart des pays. Par exemple, la plupart des pays n’ont pas de mécanismes adéquats de gouvernance des données. Les questions de savoir comment la technologie peut être utilisée? Qui est responsable? Qui décide si le système d’IA/AA fonctionne? Les réglementations inverses et les questions de souveraineté des données demeurent alors que de nombreux pays continuent de tenter d’appliquer des réglementations pour limiter le partage et le stockage transfrontalier des données de santé. Un informateur a noté que

“

La souveraineté est une question importante comme en témoignent le Rwanda et l'Inde où les gouvernements exigent de posséder les algorithmes de modèle...

”

De plus,

“

Les coûts des modèles conversationnels de langage LLM actuels sont également prohibitivement élevés pour de nombreux pays où Gavi travaille. La question demeure sur la durabilité.

”

Bien que non reflété dans la littérature sur l'application de l'IA/AA dans les pays à revenu faible et intermédiaire pour la vaccination, les biais de genre et raciaux des grands modèles de langage (LLM) largement adoptés et utilisés sont préoccupants et devraient être abordés de manière proactive grâce au développement d'approches systématiques et transparentes pour l'évaluation des biais algorithmiques et la représentativité des données. Pour répondre à ces préoccupations, une plus grande représentation par genre et divers antécédents ethniques, culturels et linguistiques est nécessaire dans la gouvernance, le développement des algorithmes et des ensembles de données.

La mise en œuvre réussie des applications d'IA/AA dans les programmes de vaccination repose sur plusieurs facteurs clés qui garantissent collectivement l'efficacité, l'efficacité et le déploiement éthique de ces technologies. L'utilisation inéquitable de l'IA peut avoir un impact significatif sur les enfants et d'autres groupes vulnérables. Par exemple, les procédures de consentement aux données peuvent s'appliquer différemment pour différents groupes d'âge (en particulier les enfants), tout comme les préoccupations en matière de confidentialité des données. De même, lors de la sollicitation de l'opinion publique sur les programmes liés à l'IA, les perspectives des enfants à travers leurs parents et enseignants devraient être essentielles (UNICEF 2021). Les mécanismes traditionnels de consentement (ou consentement éclairé) pour la capture des données peuvent être liés à l'alphabétisation numérique dans les environnements où Gavi travaille et devraient être optimisés. Plusieurs informateurs clés ont identifié

“

la disponibilité de données de haute qualité

”

comme essentielle au succès des modèles d'IA. Comme l'a dit un informateur clé,

“

*...De mauvaises données donneront
un très mauvais modèle d'IA..*

”

Une gouvernance des données fiable et une infrastructure qui soutient la collecte, le stockage et le traitement de grands ensembles de données sont cruciales pour les applications d'IA/AA. Cela inclut la capacité de gérer les entrées de données en temps réel provenant de diverses sources nécessaires à l'optimisation des services de santé et à la surveillance des maladies. Le renforcement des capacités humaines, la formation et le maintien d'une main-d'œuvre compétente en systèmes informatiques sont essentiels à la conception et à l'utilisation des systèmes d'IA/AA et de science des données. Une grande partie de la capacité et de l'innovation en matière d'IA/AA provient du secteur privé et du monde universitaire, créant un besoin de collaboration accrue entre les institutions publiques, privées et universitaires et les parties prenantes.

Recommandations

La capacité des pays soutenus par Gavi à adopter efficacement l'IA/AA pour la vaccination repose sur un leadership et une orientation solides au niveau national, ce qui permet ensuite des contributions sous-nationales efficaces de données de qualité et l'utilisation des résultats générés par l'IA/AA pour une meilleure prestation de services, une surveillance des maladies et une confiance et une demande vaccinales accrues.

Les gouvernements nationaux doivent renforcer leurs mécanismes de gouvernance des données existants pour promouvoir la disponibilité de données de haute qualité et aborder les préoccupations potentielles en matière de confidentialité, de souveraineté, de potentiel de biais ou de questions d'équité. À ce titre, les recommandations suivantes sont proposées.

- Gavi et les parties prenantes du développement devraient soutenir les gouvernements pour adopter et appliquer systématiquement des cadres de gouvernance des données de santé éprouvés en:
 - Domestiquant des règlements et des lignes directrices de données nationales plus larges dans le secteur de la santé avec le prisme des principes de gouvernance des données de santé

- Identifiant un cas d'utilisation de l'IA (de préférence la vaccination ou les soins de santé primaires) sur lequel appliquer les principes de gouvernance des données de santé et documenter le niveau de conformité grâce à la collaboration des parties prenantes.
- Promouvant, priorisant et soutenant les politiques qui renforcent la capacité locale à comprendre, interpréter, réguler et utiliser des modèles d'IA/AA éthiques.
- Gavi devrait tirer parti des politiques internes liées à l'IA et aux données pour ses programmes de vaccination et son soutien aux programmes de santé utilisant l'IA.
- Gavi devrait veiller à ce que les interventions soutenues utilisant (ou tirant parti de l'IA) adhèrent aux principes de développement numérique, en particulier en concevant avec les utilisateurs et les communautés locales, y compris les ensembles de données de formation, le cas échéant.
- Des données de haute qualité provenant de multiples sources (au-delà de la vaccination) sont essentielles pour une prise de décision plus précise en matière de vaccination, soulignant ainsi l'importance de politiques et d'infrastructures de données qui favorisent l'interopérabilité pour le renforcement des systèmes de santé intégrés.
- Les gouvernements devraient revoir les réglementations existantes qui limitent les programmes d'IA/AA (comme les exigences de souveraineté des données défavorables mises en évidence par quelques informateurs).
- Les gouvernements devraient veiller à ce que les applications d'IA/AA déployées en santé soient équitables par conception, avec une forte représentation par genre et divers groupes ethniques dans la gouvernance, le développement des modèles et les ensembles de données, ainsi que la validation et l'évaluation des résultats.
- Les gouvernements doivent établir des équipes de supervision qualifiées pour superviser l'IA/AA pour la santé, qui peuvent travailler sur des cas d'utilisation de la vaccination. Ces équipes doivent avoir des connaissances en matière de conception, d'interprétation, de révision, d'évaluation, de validation et de performance des modèles AA/AI.
- Les gouvernements devraient explorer une plus grande collaboration avec le secteur privé et le monde universitaire, où une grande partie de la capacité et de l'innovation en matière d'IA/AA pour la santé se produisent

Conclusion

L'intégration de l'intelligence artificielle (IA) et de l'apprentissage automatique (AA) dans les programmes de vaccination représente une avancée cruciale en santé publique. En tirant parti de ces technologies, des progrès significatifs peuvent être réalisés dans la couverture vaccinale, la prévision des épidémies, l'optimisation de la prestation des services de vaccination et la demande de vaccins plus ciblée et accrue. Les preuves présentées dans cette note technique soulignent le potentiel transformateur de l'IA/AA pour améliorer l'efficacité et l'efficience des programmes de vaccination.

Les conclusions clés indiquent que les modèles basés sur l'IA utilisant les enquêtes de ménages et les données géospatiales ont particulièrement réussi dans l'analyse prédictive et la microplanification. Des exemples notables du Bangladesh, du Nigéria et des États-Unis démontrent l'efficacité de ces approches pour identifier les populations sous-vaccinées et optimiser la distribution des vaccins. De plus, l'application de l'IA dans les autopsies verbales en Inde met en évidence le potentiel de l'IA pour améliorer la précision diagnostique et les résultats de santé. Les recherches prometteuses sur le soutien à la décision clinique activé par l'IA/AA dans les dossiers de santé électroniques pour la gestion du VIH suggèrent que des systèmes similaires pourraient être adaptés aux systèmes et registres d'information de vaccination électronique. De plus, les études émergentes sur l'allocation des ressources humaines aidée par l'IA dans les établissements de soins de santé primaires indiquent des applications potentielles pour optimiser le déploiement des équipes de vaccination.

Pour tirer pleinement parti des avantages de l'IA dans la vaccination, plusieurs facilitateurs clés doivent être abordés. Ceux-ci incluent la gouvernance des données, la disponibilité de données de haute qualité, une infrastructure numérique et de données solide, l'interopérabilité des systèmes, la collaboration entre les parties prenantes et une main-d'œuvre qualifiée. De plus, les considérations éthiques, les cadres réglementaires et l'engagement communautaire sont essentiels pour l'utilisation responsable et efficace de l'IA/AA. L'IA/AA a le potentiel de révolutionner les programmes de vaccination en fournissant des informations opportunes, précises et exploitables et en faisant progresser les efforts pour augmenter l'équité en santé. À mesure que ces technologies continuent d'évoluer, il est impératif d'investir dans l'infrastructure nécessaire, la gouvernance et les partenariats pour assurer leur mise en œuvre réussie. Les recommandations fournies dans cette note offrent une feuille de route pour tirer parti de l'IA/AA pour améliorer les services de vaccination, contribuant finalement à de meilleurs résultats de santé publique dans le monde entier.

Annexe A

Méthodologie de revue de la littérature

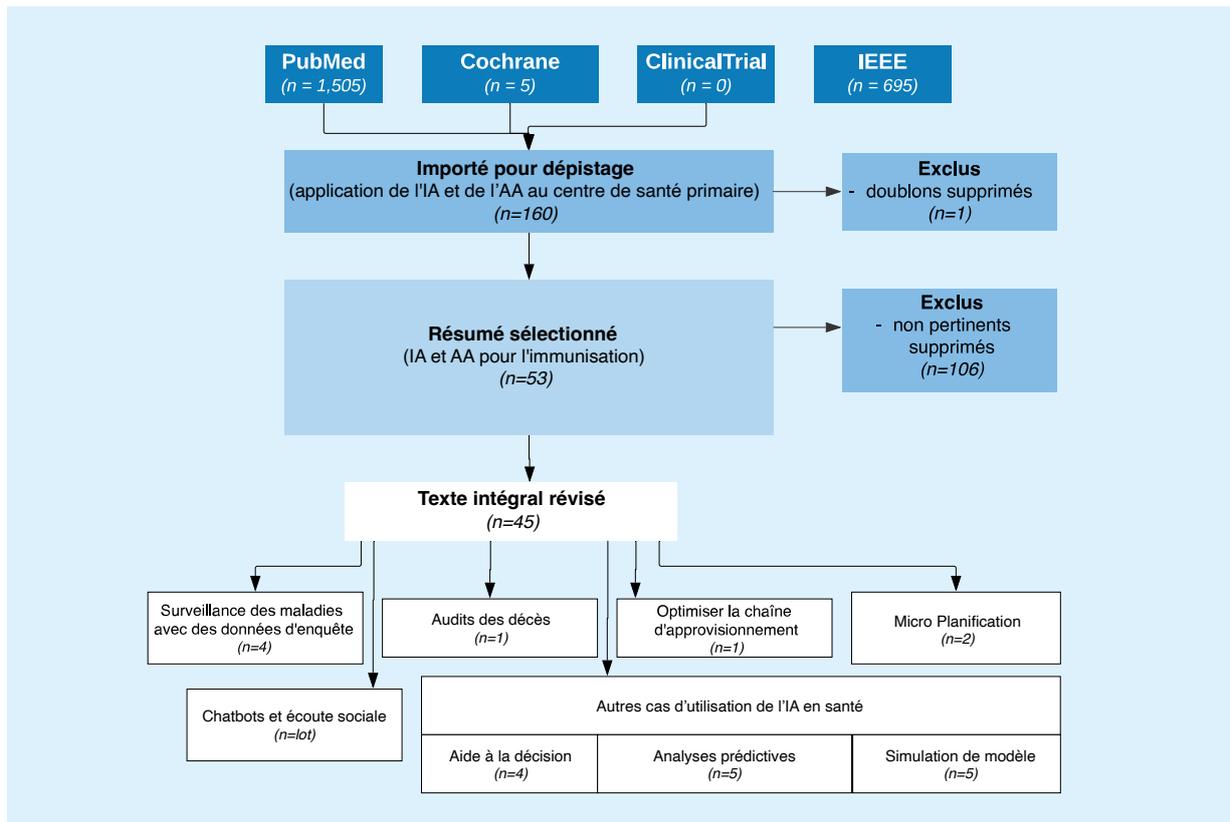
La revue de la littérature a utilisé les termes de recherche booléens suivants visant à identifier des articles publics couvrant le domaine d'intérêt (en anglais).

("measles" OR "rubella" OR "polio" OR "DPT" OR "PHC" OR "primary health care") AND ("predictive analytic" OR "machine learning" OR "ML" OR "deep learning" OR "Artificial Intelligence" OR "AI" OR "LLM" OR "Large Language Model").*

Le processus de revue de la littérature est comme dans le tableau:

Outils d'IA en santé	PubMed	Cochrane	ClinicalTrials	IEEE	TOTAL
Résultats de recherche	1,505	5	0	695	2,205
Titre criblé	83	0	0	77	160
Dé-duplication					159
Résumé					63
Examen complet					45

Figure 1: Diagramme PRISMA de la recherche systématique de la littérature



La recherche a été menée dans les bases de données suivantes : PubMed, Cochrane, ClinicalTrials.Gov, OpenGray et IEEE. De même, une recherche a également été menée sur les sites web des principaux membres de l'alliance et des organisations pertinentes comme indiqué ci-dessous pour identifier les cas d'utilisation manqués : OMS, UNICEF, Gavi, UNFPA et Africa CDC. Les critères d'inclusion et d'exclusion sont comme dans le diagramme PRISMA avec les articles non pertinents représentant les articles non spécifiquement axés sur l'application de AA/IA pour la vaccination ou les programmes de soins de santé primaires.

Annexe B

Coût de l'investissement en AA/IA pour la vaccination et les soins de santé primaires

L'intégration de l'intelligence artificielle (IA) dans les programmes de vaccination et les systèmes de santé plus larges présente un potentiel immense pour améliorer la prestation des soins de santé, améliorer l'efficacité et assurer un accès équitable aux services de santé. En 2018, Gartner prévoyait que le marché de l'IA d'entreprise atteindrait 3,9 billions de dollars d'ici 2022 (Wheatley 2018). La montée en valeur de NVIDIA, OpenAI et la course à l'IA qui a suivi ces dernières années en témoignent. La question qui se pose souvent est de savoir comment une organisation comme Gavi peut adéquatement évaluer et budgétiser une intervention IA dans ses programmes. Le coût associé à l'investissement en IA est multifacette. En raison des nombreuses dimensions différentes des investissements en IA, il peut s'avérer difficile de standardiser les métriques de coût pour le déploiement de l'IA dans un programme de vaccination. De plus, les informations sur le coût des programmes d'IA en santé sont difficiles à obtenir. Comme il n'existe actuellement aucune directive sur le coût des systèmes IA sur laquelle Gavi peut se fier. David Hall, dans son article de blog sur Medium, a catégorisé le coût de l'IA comme une combinaison de coût des données, coût informatique et coût humain.

Le coût de mise en œuvre de l'IA varie considérablement selon les différentes dimensions et est influencé par différentes caractéristiques. Cette annexe inclut les facteurs à prendre en compte lors de l'examen de l'investissement dans un système IA en santé, l'état de préparation nécessaire à l'investissement en IA, l'état des facilitateurs de santé numérique, des budgets illustratifs utilisant deux cas d'utilisation et des facteurs de coût potentiels.

Facteurs influençant le volume de l'investissement en IA dans les programmes de vaccination

1. **Fonctionnalités, taille des ensembles de données et types de données :** La complexité et les capacités d'un système IA sont dictées de manière significative par les caractéristiques qu'il offre et les données qu'il traite. Par exemple, un simple chatbot peut être gratuit ou très bon marché, tandis qu'un modèle d'IA entièrement affiné peut être prohibitif, surtout dans les contextes où Gavi travaille. Les ensembles de données plus grands, en particulier ceux nécessitant une analyse en temps réel, tels que ceux provenant des systèmes de 'données longitudinales', exigent plus de ressources informatiques et des algorithmes sophistiqués, parfois, ce qui peut augmenter considérablement les coûts. De même, le type de données – qu'elles soient structurées ou non structurées, longitudinales ou agrégées, textuelles ou imagées ou même vidéo – impacte les étapes de prétraitement et la complexité

des modèles nécessaires. Tout cela augmente le coût final de l'intervention d'investissement. Par exemple, un modèle utilisant uniquement des données d'enquête pluriannuelles coûtera beaucoup moins cher qu'un modèle utilisant des données d'imagerie provenant d'une machine IRM.

2. **Domaine d'application :** Le domaine d'intérêt impacte également le coût final, dans ce cas, le domaine de la santé, spécifiquement la vaccination et les soins de santé primaires pour la surveillance des épidémies ou la logistique de distribution des vaccins détermine la personnalisation requise des modèles d'IA. Les solutions personnalisées nécessitent souvent un temps de développement supplémentaire et une expertise de domaine, ce qui entraîne des coûts plus élevés (Kishore 2024).
3. **Considérations géographiques :** Le coût de déploiement d'un système IA avec les mêmes caractéristiques sera différent d'une région géographique à l'autre en fonction de l'état de préparation des éléments facilitateurs nécessaires. De plus, le déploiement dans des régions géographiques diverses peut influencer les coûts en raison de la disponibilité variable des données, du manque d'uniformité dans le contexte, de la maturité de l'infrastructure et des politiques de santé. Par exemple, le déploiement de solutions IA dans des contextes ruraux ou à faible ressource, similaires à ceux où Gavi travaille, pourrait nécessiter des investissements supplémentaires dans l'infrastructure et, dans certains cas, des systèmes numériques pour soutenir la collecte et l'analyse des données.
4. **Exigences matérielles et architecture logicielle :** Le choix du matériel est crucial et dépend des besoins de traitement des applications IA. Les tâches de collecte et de traitement des données à haute fréquence peuvent nécessiter des serveurs avancés ou des services cloud, ce qui a un impact significatif sur les dépenses initiales et opérationnelles. Les coûts des matériels spécialisés pour les systèmes IA peuvent varier de 5 à 100 000 dollars (Hillaman Curtis 2022). De plus, l'architecture logicielle joue un rôle crucial dans le coût final. Par exemple, les services hébergés par rapport aux systèmes autogérés varient en termes de besoins de coût.
5. **Source de données et fréquence :** Les sources à partir desquelles les données sont collectées (par exemple, registre électronique de vaccination, système national d'information sur la gestion de la santé, enquêtes pluriannuelles, autres sources de données) et la fréquence des mises à jour des données nécessitent une attention particulière. Par exemple, les données d'enquête collectées tous les cinq ans nécessitent moins de charge et d'investissement par rapport aux données des registres électroniques de vaccination collectées continuellement au point de service. De même, cela différera pour les données mensuelles des systèmes d'information sur la gestion de la santé. Ainsi, les systèmes de collecte de données en temps réel à haute fréquence impliquent des solutions de gestion et de stockage des données plus complexes que les systèmes qui ne collectent pas les données en temps réel, ce qui a un impact sur les coûts.
6. **Type d'application IA :** Différentes applications IA, des analyses prédictives aux systèmes de soutien à la décision, ont chacune leur propre ensemble de besoins et de coûts. Les analyses prédictives peuvent nécessiter une formation

continue des données et un ajustement des modèles, tandis que les systèmes de recommandations activés par le soutien à la décision peuvent nécessiter une conception d'interface utilisateur et des tests d'intégration étendus.

7. **Expertise en sciences des données et IA :** Le niveau d'expertise requis pour développer, déployer et maintenir les systèmes IA peut être un facteur de coût significatif. Par exemple, le salaire moyen d'un ingénieur en apprentissage automatique aux États-Unis est de 160 791 dollars (Indeed 2024). Des coûts comme ceux-ci sont tout simplement prohibitifs et, dans les pays en développement où Gavi travaille, trouver des talents avec les compétences est difficile. Par conséquent, l'embauche de professionnels qualifiés ou la formation du personnel existant aux technologies IA nécessite un investissement substantiel, qui peut être continu en fonction de la complexité du système et des besoins de support.
8. **Stratégie d'accès à l'IA :** Que le système IA soit déployé sur site ou via des services cloud affecte à la fois les coûts initiaux et les coûts de maintenance. Les solutions cloud peuvent réduire les coûts initiaux du matériel, mais peuvent entraîner des dépenses opérationnelles à long terme plus élevées en raison des abonnements aux services et des frais de stockage des données. De même, que le système soit accessible via mobile ou ordinateur de bureau, ou une combinaison des deux, peut potentiellement augmenter le coût et l'échelle de l'investissement.
9. **Nombre d'utilisateurs :** L'échelle à laquelle le système IA sera utilisé impacte également le coût, en particulier si le système doit prendre en charge plusieurs utilisateurs à différents endroits. Les frais de licence, la formation des utilisateurs et le support système seront échelonnés en conséquence, affectant le budget global..

Préparation des programmes nationaux de vaccination pour l'investissement en IA

Évaluer la préparation d'un pays pour l'investissement en IA implique d'évaluer l'infrastructure actuelle du système de santé, les capacités de gestion des données et les compétences en ressources humaines. La préparation est essentielle pour garantir que l'introduction des technologies d'IA conduit aux améliorations attendues. Les indicateurs clés de préparation incluent le niveau actuel de numérisation du système de santé, la capacité d'intégration des données à travers plusieurs plateformes de santé, la disponibilité de personnel qualifié en matière de gestion et d'analyse des données ou des systèmes IA, et une infrastructure informatique prête à prendre en charge les technologies IA. L'équipe de données de "Future Processing" a développé et présenté un cadre pour l'évaluation de la préparation à l'IA comme indiqué dans la figure.

Figure 2: Cadre d'évaluation de l'état de préparation à l'IA (équipe FP Data Solutions, 2024)



Facilitateurs de santé numérique pertinents pour les programmes de vaccination

Pour que l'IA soit intégrée avec succès dans les programmes nationaux de vaccination, plusieurs facilitateurs de santé numérique sont une condition préalable (GDHM 2024):

- **Infrastructure** : Un matériel informatique adéquat, l'électricité et la connectivité Internet sont essentiels pour soutenir les fonctionnalités IA, en particulier dans les zones reculées ou mal desservies.
- **Normes et interopérabilité** : Les pays doivent s'assurer que les outils IA peuvent communiquer avec les systèmes de santé numériques existants via des protocoles standardisés pour une utilisation sans faille.
- **Main-d'œuvre adéquate et experte** : Renforcer les capacités en IA et en compétences d'annotation des données au sein de la main-d'œuvre de santé est nécessaire pour gérer et maintenir efficacement les systèmes IA.
- **Registres numériques fondamentaux** : Des registres de données de santé robustes sont cruciaux pour former les systèmes IA et faciliter leur application pratique dans les programmes de santé, y compris la vaccination.
- **Politiques et législations pertinentes** : Des politiques et législations de soutien qui favorisent la gouvernance des données, la confidentialité, l'éthique de l'IA et la sécurité sont fondamentales pour l'adoption et l'échelle des technologies IA.

- **Disponibilité de sources de données adéquates provenant des interventions prioritaires de santé numérique :** Le succès des applications IA dépend fortement de la disponibilité et de la qualité des données. Pour les programmes de vaccination, les données pertinentes peuvent inclure les taux de vaccination, les niveaux de stock, l'état de la chaîne du froid et le suivi des épidémies. S'assurer que ces données sont collectées de manière cohérente et standardisée pour être utilisées dans les systèmes IA est crucial pour des résultats IA précis et efficaces. Les organisations comme Gavi devraient collaborer avec des organisations spécialisées en IA externes plutôt que de maintenir une équipe IA.

Budget illustratif par pays (en utilisant deux cas d'utilisation)

Un budget illustratif pour l'intégration de l'IA dans un programme national de vaccination devrait prendre en compte les coûts initiaux de mise en place, les coûts opérationnels continus et les coûts potentiels de mise à l'échelle. Ce budget doit inclure des investissements dans l'infrastructure, la formation, la gestion des données, les licences de logiciels et éventuellement les frais de consultation pour des conseils d'experts en matière de mise en œuvre. L'hypothèse sous-jacente est qu'un système IA dispose déjà d'un système numérique déployé pour la collecte de données de routine.

Cas d'utilisation 1 :

Les systèmes IA basés sur l'abonnement couvrent souvent largement les coûts de matériel GPU, d'électricité et de réseau. Cela exclut les coûts associés à la collecte des données (ou une partie des données) qui seront utilisées par le système IA. S'il est nécessaire de former et de réformer en continu le modèle, il peut y avoir des coûts supplémentaires liés aux ingénieurs IA qui contribueront à cette tâche. L'abonnement inclut le coût pour maintenir une cybersécurité robuste et une conformité locale et internationale adéquate. Cette licence peut varier de 20 à 500 ou 5000 dollars par mois en fonction des métriques d'utilisation. Par exemple, dans les scénarios d'API ChatGPT où le paiement par utilisation est appliqué, les coûts de jetons peuvent être évalués à partir de <https://openai.com/api/pricing/>. Il est attendu que d'autres grands modèles de langage (LLM) introduisent déjà des modèles de tarification basés sur les jetons similaires.

Cas d'utilisation 2 :

Dans le deuxième scénario, si Gavi souhaite s'associer avec des organisations spécialisées en IA (par exemple, comme Exchange Design ou Audrea) pour investir dans une IA à usage spécial pour un programme de vaccination spécifique d'un pays, tous les facteurs décrits ci-dessus doivent être pris en compte dans le processus de tarification. Le coût inclura les coûts de collecte de données en plus de l'application de l'IA sur les données collectées pour générer et appliquer les informations pertinentes. Les principaux facteurs de coût dans ce cas d'utilisation de la mise en œuvre de l'IA incluent :

- **Acquisition de technologie** : Coûts initiaux pour l'achat de logiciels IA ou le développement personnalisé.
- **Mise à niveau de l'infrastructure** : Coûts associés à la mise à niveau de l'infrastructure de santé numérique existante pour prendre en charge les fonctionnalités IA.
- **Formation et renforcement des capacités** : Dépenses liées à la formation du personnel pour utiliser et maintenir les systèmes IA.
- **Gestion des données** : Coûts pour la collecte, le stockage et l'analyse des données, y compris les mesures de confidentialité et de sécurité des données.
- **Maintenance et mises à jour** : Coûts continus pour garantir que les systèmes IA restent opérationnels et à jour avec la dernière technologie.

Conclusion:

Investir dans l'IA pour les programmes de vaccination et les systèmes de santé plus larges offre un potentiel substantiel pour améliorer les résultats de santé, rationaliser les opérations et promouvoir un accès équitable aux services de santé. Cependant, ces investissements doivent être soigneusement planifiés avec une compréhension claire des coûts associés et des facteurs de préparation. En abordant ces aspects de manière globale, Gavi, l'Alliance du Vaccin, peut soutenir les pays dans la prise de décisions éclairées qui alignent les capacités et les objectifs de leur système de santé, en veillant à ce que l'investissement dans les technologies IA soit nécessaire et fournisse les avantages escomptés sans conséquences inattendues..

Remerciements

Quinze personnes ont été interviewées pour valider la revue de la littérature par un échantillonnage des implémenteurs de l'IA en santé en tirant parti des contacts mondiaux en santé numérique. Nous remercions donc les personnes suivantes : Cassie Morgan, Daniel Oyaole, Daniel Futerma, Dino Rech, Duruanyanwu Ifeanyi, Dylan Green, Friedman Jonathan, Kumar Megha, Matiko Machagge, Oyudari Baatartsogt, Richard Holman, Matanta Rosita, Zaimova Tracey Li, Vicent Manyilizu, Uwe Wahser et Yasmin Chandani.

Références

- Addy, A. (2021). Artificial Intelligence in the Supply Chain Management for Vaccine Distribution in the West African Healthcare Sector with a focus on Ghana. *International Journal of Legal Science & Innovation*, 5(6), 1701–1705. <https://doi.org/10.10000/IJLSI.111706>
- AMA. (2024). *Code of Medical Ethics*. <https://www.ama-assn.org/topics/ama-code-medical-ethics>
- Baal, S. T. van, Le, S., Fatehi, F., Verdejo-Garcia, A., & Hohwy, J. (2023). Effecting behaviour change using an artificial intelligence chatbot: A pilot randomised controlled study. *PsyArXiv Preprints*. <https://doi.org/10.31234/osf.io/2xuat>
- Bhat, S. S., Srihari, V. R., Prabhune, A., Mallawaram, A., & Bidrohi, A. B. (2024). Improving Manpower Allocation at Primary Healthcare Facilities: Development and Validation of a Machine Learning Quadratic Model to Strengthen Public Health Service Availability. *2024 International Conference on Intelligent and Innovative Technologies in Computing, Electrical and Electronics (IITCEE)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/IITCEE59897.2024.10467473>
- Bi, Q., Goodman, K. E., Kaminsky, J., & Lessler, J. (2019). What is Machine Learning? A Primer for the Epidemiologist. *American Journal of Epidemiology*. <https://doi.org/10.1093/aje/kwz189>
- Boland, M. R., Polubriaginof, F., & Tatonetti, N. P. (2017). Development of A Machine Learning Algorithm to Classify Drugs Of Unknown Fetal Effect. *Scientific Reports*, 7(1), 12839. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-12943-x>
- Bolongaita, S., Villano, D., Tessema Memirie, S., Kiros Mirutse, M., Mirkuzie, A. H., Comas, S., Rumpler, E., Wu, S. M., Sato, R., Chang, A. Y., & Verguet, S. (2022). Modeling the relative risk of incidence and mortality of select vaccine-preventable diseases by wealth group and geographic region in Ethiopia. *PLOS Global Public Health*, 2(8), e0000819. <https://doi.org/10.1371/journal.pgph.0000819>
- Chingombe, I., Dzinamarira, T., Cuadros, D., Mappingure, M. P., Mbunge, E., Chaputsira, S., Madziva, R., Chiurunge, P., Samba, C., Herrera, H., Murewanhema, G., Mugurungi, O., & Musuka, G. (2022). Predicting HIV Status among Men Who Have Sex with Men in Bulawayo & Harare, Zimbabwe Using Bio-Behavioural Data, Recurrent Neural Networks, and Machine Learning Techniques. *Tropical Medicine and Infectious Disease*, 7(9), 231. <https://doi.org/10.3390/tropicalmed7090231>
- Chowdary, N. D., Kumar, M. R., Reddy, R. S. K., Maharaj, T. U. C. S., Reddy, U. S., & Sumanth, P. (2023). Diagnostic Lab Locator and Health Care System using Cloud Computing and Machine Learning. *2023 7th International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (ICICCS)*, 382–386. <https://doi.org/10.1109/ICICCS56967.2023.10142627>
- Columbia Engineering. (2024). *Artificial Intelligence (AI) vs Machine Learning*. <https://ai.engineering.columbia.edu/ai-vs-machine-learning/>

Cutts, F. T., Dansereau, E., Ferrari, M. J., Hanson, M., McCarthy, K. A., Metcalf, C. J. E., Takahashi, S., Tatem, A. J., Thakkar, N., Truelove, S., Utazi, E., Wesolowski, A., & Winter, A. K. (2020). Using models to shape measles control and elimination strategies in low- and middle-income countries: A review of recent applications. *Vaccine*, 38(5), 979–992. <https://doi.org/10.1016/j.vaccine.2019.11.020>

Dong, T. Q., & Wakefield, J. (2021). Modeling and presentation of vaccination coverage estimates using data from household surveys. *Vaccine*, 39(18), 2584–2594. <https://doi.org/10.1016/j.vaccine.2021.03.007>

FP Data Solutions Team. (2024). *AI Pricing: how much does Artificial Intelligence cost?* Future Processing. <https://www.future-processing.com/blog/ai-pricing-is-ai-expensive/>

García-Peñalvo, F., & Vázquez-Ingelmo, A. (2023). What Do We Mean by GenAI? A Systematic Mapping of The Evolution, Trends, and Techniques Involved in Generative AI. *International Journal of Interactive Multimedia and Artificial Intelligence*, 8(4), 7. <https://doi.org/10.9781/ijimai.2023.07.006>

GDHM. (2024). *Global Digital Health Monitor (GDHM)*. <https://monitor.digitalhealthmonitor.org/map>

Glock, K., Napier, C., Gary, T., Gupta, V., Gigante, J., Schaffner, W., & Wang, Q. (2021). Measles Rash Identification Using Transfer Learning and Deep Convolutional Neural Networks. *2021 IEEE International Conference on Big Data (Big Data)*, 3905–3910. <https://doi.org/10.1109/BigData52589.2021.9671333>

Hall, K., Chang, V., & Jayne, C. (2022). A review on Natural Language Processing Models for COVID-19 research. *Healthcare Analytics*, 2, 100078. <https://doi.org/10.1016/j.health.2022.100078>

Hasan, M. K., Jawad, M. T., Dutta, A., Awal, M. A., Islam, M. A., Masud, M., & Al-Amri, J. F. (2021). Associating Measles Vaccine Uptake Classification and its Underlying Factors Using an Ensemble of Machine Learning Models. *IEEE Access*, 9, 119613–119628. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3108551>

Health Data Governance Principles. (2023). <https://healthdatapinciples.org>

Hill, R. K. (2016). What an Algorithm Is. *Philosophy & Technology*, 29(1), 35–59. <https://doi.org/10.1007/s13347-014-0184-5>

Hillman Curtis. (2022). *FPGA PROGRAMMING AND ITS COST COMPARISON*. <https://hillmancurtis.com/fpga-programming-and-its-cost-comparison/>

IBM Research. (2024). *What is Generative AI?* <https://research.ibm.com/blog/what-is-generative-AI>

Iidula-Thomas, S., Gawde, U., & Jha, P. (2021). Comparison of machine learning algorithms applied to symptoms to determine infectious causes of death in children: national survey of 18,000 verbal autopsies in the Million Death Study in India. *BMC Public Health*, 21(1), 1787. <https://doi.org/10.1186/s12889-021-11829-y>

indeed. (2024). *Build a Career you'll love*. <https://www.indeed.com/career/machine-learning-engineer/salaries>

Jacaranda Health. (2023). *PROMPTS - Promoting Mothers in Pregnancy and Postpartum Through SMS*. <https://jacarandahealth.org/ypoagriw/2023/11/PROMPTS-BROCHURE-V4.pdf>

Jiang, F., Jiang, Y., Zhi, H., Dong, Y., Li, H., Ma, S., Wang, Y., Dong, Q., Shen, H., & Wang, Y. (2017). Artificial intelligence in healthcare: past, present and future. *Stroke and Vascular Neurology*, 2(4), 230–243. <https://doi.org/10.1136/svn-2017-000101>

Kishore, Y. (2024). Optimizing Enterprise Conversational AI: Accelerating Response Accuracy with Custom Dataset Fine-Tuning. *Intelligent Information Management*, 16(02), 65–76. <https://doi.org/10.4236/iim.2024.162005>

Kumar, M., Chen, L., Tan, K., Ang, L. T., Ho, C., Wong, G., Soh, S. E., Tan, K. H., Chan, J. K. Y., Godfrey, K. M., Chan, S., Chong, M. F. F., Connolly, J. E., Chong, Y. S., Eriksson, J. G., Feng, M., & Karnani, N. (2022). Population-centric risk prediction modeling for gestational diabetes mellitus: A machine learning approach. *Diabetes Research and Clinical Practice*, 185, 109237. <https://doi.org/10.1016/j.diabres.2022.109237>

OECD. (2017). *OECD Recommendation on Health Data Governance*. <https://www.oecd.org/els/health-systems/health-data-governance.htm>

Ong, L., & Wee, M. (2020). *The use of digital technology to improve vaccine delivery in India and Indonesia*. Blog.

Prabhune, A., Srihari, V. R., Bidrohi, A. B., Reddy, A., & Mallawaram, A. (2024). Enhancing Accessibility to Primary Healthcare Centres through the Development and Validation of a Machine Learning-based Gravity Model: Strengthening Public Health Coverage. *2024 International Conference on Intelligent and Innovative Technologies in Computing, Electrical and Electronics (IITCEE)*, 1–7. <https://doi.org/10.1109/IITCEE59897.2024.10467863>

Ramos, K. S. G., & Peramo, E. C. (2024). Optimizing Healthcare Accessibility: An Integration of GIS and Machine Learning for Strategic Hospital Facility Location Planning. *2024 International Conference on Artificial Intelligence in Information and Communication (ICAIIIC)*, 158–163. <https://doi.org/10.1109/ICAIIIC60209.2024.10463219>

Rocha, T. A. H., de Thomaz, E. B. A. F., de Almeida, D. G., da Silva, N. C., Queiroz, R. C. de S., Andrade, L., Facchini, L. A., Sartori, M. L. L., Costa, D. B., Campos, M. A. G., da Silva, A. A. M., Staton, C., & Vissoci, J. R. N. (2021). Data-driven risk stratification for preterm birth in Brazil: a population-based study to develop of a machine learning risk assessment approach. *The Lancet Regional Health - Americas*, 3, 100053. <https://doi.org/10.1016/j.lana.2021.100053>

Romero-Brufau, S., Wyatt, K. D., Boyum, P., Mickelson, M., Moore, M., & Cognetta-Rieke, C. (2020). A lesson in implementation: A pre-post study of providers' experience with artificial intelligence-based clinical decision support. *International Journal of Medical Informatics*, 137, 104072. <https://doi.org/10.1016/j.ijmedinf.2019.104072>

Ru, B., Kujawski, S., Lee Afanador, N., Baumgartner, R., Pawaskar, M., & Das, A. (2023). Predicting Measles Outbreaks in the United States: Evaluation of Machine Learning Approaches. *JMIR Formative Research*, 7, e42832. <https://doi.org/10.2196/42832>

- Siddiqi, D. A., Abdullah, S., Dharma, V. K., Shah, M. T., Akhter, M. A., Habib, A., Khan, A. J., & Chandir, S. (2021). Using a low-cost, real-time electronic immunization registry in Pakistan to demonstrate utility of data for immunization programs and evidence-based decision making to achieve SDG-3: Insights from analysis of Big Data on vaccines. *International Journal of Medical Informatics*, 149, 104413. <https://doi.org/10.1016/j.ijmedinf.2021.104413>
- UNDP. (2024). *Improving vaccine systems - EVIN*. <https://www.undp.org/india/projects/improving-vaccination-systems-evin>
- UNICEF. (2021). *National AI strategies and Children: Reviewing the landscape and identifying windows of opportunity*. <https://www.unicef.org/innocenti/media/2516/file/UNICEF-Global-Insight-national-AI-strategy-review-policy-brief.pdf>
- Weng, J. (2015). Brain as an Emergent Finite Automaton: A Theory and Three Theorems. *International Journal of Intelligence Science*, 05(02), 112–131. <https://doi.org/10.4236/ijis.2015.52011>
- Wheatley, M. (2018). *Gartner: Enterprise AI market to hit \$1.2 trillion this year*. Emerging Tech. <https://siliconangle.com/2018/04/25/gartner-enterprise-ai-market-hit-1-2-trillion-year/>
- WHO. (2017). *WHO Guidelines on Ethical Issues in Public Health Surveillance*. <https://www.who.int/publications/i/item/9789241512657>
- WHO. (2024). *The role of artificial intelligence in sexual and reproductive health and rights*. <https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/376294/9789240090705-eng.pdf?sequence=1>
- Yao, Y., Duan, J., Xu, K., Cai, Y., Sun, Z., & Zhang, Y. (2024). A Survey on Large Language Model (LLM) Security and Privacy: The Good, The Bad, and The Ugly. *High-Confidence Computing*, 4(2), 100211. <https://doi.org/10.1016/j.hcc.2024.100211>
- Zimmermann, M., Frey, K., Hagedorn, B., Oteri, A. J., Yahya, A., Hamisu, M., Moge kwu, F., Shuaib, F., McCarthy, K. A., & Chabot-Couture, G. (2019). Optimization of frequency and targeting of measles supplemental immunization activities in Nigeria: A cost-effectiveness analysis. *Vaccine*, 37(41), 6039–6047. <https://doi.org/10.1016/j.vaccine.2019.08.050>