

Article

Une solution innovante d'évaluation de la sécurité des chantiers de construction Basé sur l'intégration du réseau bayésien et de l'analyse Processus hiérarchique

Lizhao Xiao ^{1,*}, Llewellyn CM Tang ¹ et Ya Wen

¹ Département de l'immobilier et de la construction, Faculté d'architecture, Université de Hong Kong, Pokfulam, Hong Kong, Chine ; lcmtang@hku.hk

² Département d'ingénierie, Université de Cambridge, Cambridge CB2 1PZ, Royaume-Uni ; yw710@cam.ac.uk

* Correspondance : u3008759@connect.hku.hk

Résumé : L'industrie de la construction de bâtiments en Chine continentale se distingue par l'un des taux d'accidents et de décès les plus élevés. L'évaluation des risques joue donc un rôle important dans la prévention des incidents de sécurité et des pertes économiques. Cependant, les méthodes traditionnelles d'évaluation des risques sont principalement basées sur l'expérience, ce qui pourrait introduire des incertitudes significatives dans l'estimation de la chaîne d'accidents, l'analyse quantitative et la gestion de l'incertitude. Les accidents liés à la sécurité sont difficiles à estimer, ce qui peut conduire à une prise de décision inappropriée en matière de sécurité. Pour résoudre ce problème, une stratégie d'analyse quantitative innovante a été développée, générant un indice de perte pour divers accidents survenus sur le chantier, basé sur la solution Bayesian Network et Analytic Hierarchy Process. Dans cette solution, le taux de contribution de chaque facteur de risque à un certain accident peut être calculé. Sur cette base, l'indice de perte de chaque chantier de construction peut être calculé en saisissant les facteurs de risque actuels sur le chantier de construction. De plus, l'indice de perte en temps réel peut être estimé, ce qui peut aider l'équipe de direction à prendre des décisions plus précises par rapport aux approches traditionnelles. Avec ce modèle, la situation de sécurité sur le chantier peut être clarifiée et la priorité des risques peut être analysée en fonction de l'état dynamique.



Citation : Xiao, L. ; Tang, LCM ; Loupe, Y. Un chantier innovant

Solution d'évaluation de la sécurité basée sur l'intégration du réseau bayésien et du processus de hiérarchie analytique. *Bâtiments* 2023, 13, 2918. <https://doi.org/10.3390/buildings13122918>

Rédacteurs académiques : Abdulquadi Ade Bilau et Emlyn Witt

Reçu : 19 octobre 2023

Révisé : 16 novembre 2023

Accepté : 17 novembre 2023

Publié : 23 novembre 2023



Copyright : © 2023 par les auteurs. Licencié MDPI, Bâle, Suisse.

Cet article est un article en libre accès distribué selon les termes et conditions des Creative Commons

Licence d'attribution (CC BY) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Mots-clés : Réseau Bayésien ; AHP ; évaluation de la sécurité des constructions ; l'évaluation des risques ; analyse quantitative des risques

1. Introduction

Une évaluation précise des risques de sécurité dans les projets de construction de bâtiments est toujours un sujet important dans le domaine de la construction. Les performances en matière de sécurité de la construction de bâtiments en Chine sont encore inférieures à celles des autres pays développés [1]. De nombreuses équipes et intervenants sont impliqués dans un même projet de construction. Dans le secteur de la construction en Chine, les travailleurs migrants constituent la majorité des nombreuses équipes de construction, et notamment les personnes âgées de 50 ans et plus représentent 24,6 % de cette main-d'œuvre, comme l'a rapporté le Bureau national des statistiques en 2021 [2]. Le vieillissement des travailleurs de la construction constitue un défi de taille. Ce changement démographique souligne la nécessité d'interventions immédiates et ciblées dans les protocoles de sécurité et d'une réévaluation stratégique des pratiques actuelles pour assurer le bien-être de ce segment plus âgé de la main-d'œuvre. En 2019, il y a eu 773 accidents de construction et 904 décès [3]. Par conséquent, la gestion de la sécurité dans la construction exige une concentration accélérée et des stratégies renforcées pour s'adapter à la situation actuelle. Une évaluation précise des risques pour la sécurité peut réduire le nombre de victimes chez les travailleurs et éviter des pertes économiques.

Actuellement, la plupart des recherches se concentrent sur l'analyse des risques et le raisonnement des accidents. Cependant, il propose rarement une solution pratique et ciblée aux autorités de gestion pour mettre en œuvre des stratégies améliorées de gestion de la sécurité. Le tableau 1 présente l'étude comparative de la méthode de gestion populaire sur les modèles de prévision et de gestion de la sécurité et des risques. Le réseau bayésien (BN) et le processus de hiérarchie analytique (AHP) sont proposés dans

ce document à utiliser comme solution intégrée pour l'analyse des risques dans le secteur de la construction. BN est défini comme un modèle graphique probabiliste représentant une série de variables constituées de nœuds et d'arêtes via un graphe acyclique orienté (DAG) [4]. Et AHP est une stratégie de conception multicritère utilisée pour des problèmes complexes avec une analyse hiérarchique [5].

Grâce à la méthode BN-AHP intégrée, la situation de sécurité dans la construction peut être évaluée facilement et précisément avec une prise de décision en temps réel.

Tableau 1. Analyse comparative des stratégies de gestion de la sécurité.

Recherche	Gestion de la sécurité Stratégie	Description	Limites
[6]	Complet Causes des accidents Modèle	Fournir un aperçu complet des causes potentielles des accidents	Complet, mais trop complexe pour fournir des résultats d'évaluation en temps réel
[7]	Trois types de Modèle de danger	Fournir un cadre nuancé pour les risques d'identification et l'évaluation des risques	Ne prend pas suffisamment en compte les effets croisés des causes d'accidents
[8]	Cause de l'accident Modèle « 2–4 »	Disséquer et catégoriser les facteurs causaux des accidents dans un cadre gérable	Trop dépendant de la catégorisation initiale, incapable de s'adapter en temps réel aux conditions du site
[9]	Intégration–Dynamique Accident d'État Modèle de causalité	Fusionne les facteurs et la dynamique dans la causalité des accidents	La complexité du modèle peut entraver l'application pratique et la réponse en temps réel
[dix]	Modèle « Type d'arbre » de Cause de l'accident	Organise les causes d'accidents de manière hiérarchique	Peut ne pas saisir les interdépendances complexes entre les causes

Ce document se concentre sur les objectifs suivants : a. identification des indicateurs de risque directs et des indicateurs de risque indirects d'accidents de construction, b. prédiction de l'indice de perte économique pour l'évaluation des risques de construction sur la base de l'analyse de la proportion et de la gravité de chacun des indicateurs de risque au moyen de la méthode BN-AHP, et c. vérification de l'utilisabilité du modèle de perte économique. Pour atteindre les objectifs ci-dessus, les méthodes actuelles d'évaluation des risques sont d'abord examinées. Le BN et l'AHP ont été largement utilisés dans l'évaluation des risques et la gestion de la sécurité dans diverses industries. Cependant, peu de chercheurs appliquent la solution intégrée BN-AHP pour le contrôle de sécurité dans le secteur de la construction en raison de la complexité du chantier de construction. La section suivante présente la solution intégrée BN-AHP, y compris la collecte de données, l'analyse BN-AHP et la vérification du modèle.

Les perspectives de l'homme, de la machine, du matériau, de la méthode et de l'environnement (4M1E) sont sélectionnées comme cinq critères du modèle AHP pour évaluer la gravité des accidents dans la gestion de la sécurité de la construction. De plus, les résultats par étapes sont présentés et discutés. De plus, les avantages et les limites du modèle ont été analysés. Dans le cadre de la collecte de davantage de données sur le projet, ce modèle d'évaluation de la sécurité peut être encore optimisé lors de la prochaine étape de la recherche. Dans cette recherche, l'auteur a collecté les événements accidentels sur le chantier de construction et extrait les facteurs de risque de la base de données. Ce modèle favorise la capacité du service de gestion à réaliser l'ajustement en temps opportun de la stratégie de gestion de la sécurité. En conséquence, une optimisation supplémentaire des investissements et du budget pour la gestion de la sécurité des chantiers de construction peut être obtenue. Dans le même temps, le modèle peut être défini comme module de sécurité et placé dans la plateforme de gestion de projet de construction en ligne (c'est-à-dire le système numérique de supervision des travaux) pour former une évaluation de sécurité en temps réel de l'ensemble de l'avancement du projet de construction.

De nos jours, la gestion de la sécurité sur les chantiers manque d'une gestion systématique de haut en bas. Cela dépend principalement de l'expérience personnelle des chefs de projet et du personnel de gestion de la sécurité. Cependant, la qualité du personnel de gestion de la sécurité est inégale, la méthode exacte des mesures de sécurité ne peut pas non plus être déterminée en temps réel et des jugements différents peuvent être portés par le personnel de sécurité, ce qui rend le processus très inefficace. Il existe peu de stratégies spécifiques de gestion de la sécurité fournies au responsable de la sécurité sur la base d'une analyse convaincante des données. L'innovation de cette étude réside dans son analyse quantitative des facteurs contribuant aux incidents de sécurité répandus dans le secteur de la construction. En utilisant cette quantification, l'article développe un modèle d'évaluation des risques qui permet aux responsables de la sécurité de déterminer les répercussions économiques associées à diverses stratégies d'atténuation des risques. Ce modèle sert de pierre angulaire aux processus décisionnels descendants, permettant aux équipes faisant autorité d'élaborer des politiques précises et fondées sur des preuves. De plus, le modèle de perte économique présenté ici est conçu pour offrir des recommandations dynamiques, s'adaptant à l'évolution des conditions sur les chantiers de construction. La flexibilité et la réactivité de ce modèle garantissent qu'il reste pertinent face aux réalités fluctuantes du site, fournissant ainsi un outil robuste pour la sécurité stratégique et la planification financière dans le secteur de la construction.

2. Revue de la littérature

2.1. Méthode d'évaluation des risques

Les modèles actuels d'évaluation des risques dans la gestion de la sécurité dans la construction impliquent principalement des analyses qualitatives et quantitatives [11]. Au cours des quatre dernières décennies, de nombreux modèles d'analyse d'accidents ont été proposés en Chine, tels que la simulation de Monte Carlo, les arbres de décision, les arbres de défaillances, l'AMDEC, les réseaux complexes, etc. [12]. De plus, l'analyse quantitative des risques (QRA) est appliquée dans de nombreuses industries comme méthode pour améliorer les performances de sécurité [13]. L'une des méthodes d'analyse les plus connues et largement utilisées dans les perspectives d'évaluation des risques dans l'industrie de la construction est le cadre 4M1E, qui comprend l'homme, le matériau, la machine, la méthode et l'environnement [14-17]. Cependant, une analyse des risques efficace doit être menée sur la base à la fois de la probabilité d'accidents potentiels et de leur gravité [18]. Plus précisément, en ce qui concerne la gestion de la sécurité dans le secteur de la construction, l'évaluation des risques comprend principalement l'évaluation de la probabilité (probabilité) et des conséquences potentielles (gravité) des dangers. Cette double évaluation aide l'équipe de direction à avoir une compréhension globale des risques potentiels pour prioriser et mettre en œuvre les mesures d'atténuation appropriées [19]. Dans cette recherche, le BN est utilisé pour compléter l'analyse quantitative du niveau de risque. Et l'ANP basé sur le cadre 4M1E est considéré comme une méthode importante pour classer les facteurs de risque afin de guider la prise de décision ultérieure dans le processus de gestion de la sécurité.

2.2. Évaluation quantitative des risques

Les avantages de la mise en œuvre des méthodes d'évaluation quantitative des risques (QRA) sont soulignés dans divers domaines [20]. De plus, la vérification de la validité de l'évaluation quantitative sur les problèmes liés à la sécurité est également largement discutée [13,21].

Les approches quantitatives ont également été impliquées dans de nombreuses normes et directives de gestion des risques, ce qui apporte les avantages d'une meilleure performance de la gestion des risques [22].

Dans le secteur de la construction, les méthodes d'évaluation quantitative sont également courantes, utilisées non seulement pour évaluer les performances de sécurité, mais également pour prédire les activités de construction à haut risque sur la base des données d'accidents [23,24]. De plus, la gravité des activités de construction à haut risque peut être analysée en garantissant que les facteurs de risque sont confirmés par QRA [25].

Cela fait environ 30 ans que la QRA a été appliquée pour la première fois à de vastes systèmes technologiques. Initialement, l'évaluation des niveaux de sécurité à l'aide de la QRA utilisait généralement une méthode ascendante. Actuellement, les évaluations modernes des risques QRA ont évolué vers une approche descendante. Il vise à répondre à trois questions : la cause du risque, sa probabilité et quelles sont ses conséquences. Au-delà de cela, certains auteurs préconisent également d'évaluer l'impact des risques

d'un point de vue financier également. Il a été proposé que le « coût du risque » puisse être utilisé comme modèle de risque PI (Probabilité-Impact) à échelle commune [26,27]. Une autre équation quantitative d'évaluation des risques est proposée, qui montre que le risque est étroitement lié au danger et à l'exposition. Cela souligne que les stratégies visant à résoudre les problèmes de sécurité dans la construction visent à maximiser les améliorations sur ces deux points.

2.3. Processus de hiérarchie analytique

La relation de gravité entre les risques peut être analysée sur la base du modèle AHP. Il a été introduit pour la première fois en 1968 puis développé par Saaty [28]. Le modèle AHP est couramment utilisé dans la théorie de la décision et prend en compte des critères contradictoires, mesurables et abstraits [29,30]. Les comparaisons par paires sont appliquées dans la méthode AHP. Les critères sélectionnés font l'objet d'une analyse de leurs poids et priorités pour calculer la relation de gravité entre les différents risques [5]. Les critères liés aux questions clés sont catégorisés puis hiérarchisés. L'évaluation des risques pour la santé et la sécurité au travail a été réalisée sur la base de l'AHP flou de Pythagore et du système d'inférence floue [31]. De plus, le classement des risques basé sur la méthode AHP est également réalisé par Goerlandt, Khakzad et Reniers [13].

Dans le secteur de la construction, il est prouvé que l'AHP peut aider à trier les facteurs les plus graves lors de l'examen du risque pour la sécurité de la construction [32]. Le modèle d'évaluation des risques de chute de hauteur est analysé par Shi et al. [33]. L'ensemble des pondérations des 4 catégories et 23 sous-catégories est établi sur la base de la méthode AHP. L'évaluation du risque est la première étape de l'optimisation de la gestion de la sécurité. Il est important d'analyser la relation de gravité des risques pour permettre aux autorités de prendre des décisions éclairées en matière de gestion ultérieure de la sécurité, y compris la planification du travail et le contrôle budgétaire. Bien que l'AHP se soit avérée être une méthode efficace, il existe seulement quelques études sur son adoption dans les techniques d'évaluation des risques critiques pour la sécurité dans les projets de construction [34,35].

2.4. Évaluation des risques basée sur le réseau bayésien

(BN) Les BN sont représentés sous forme de graphiques acycliques orientés. Ils sont composés de nœuds et de lignes pour représenter les variables ainsi que leur relation dirigée. Cette méthode permet d'exprimer des incertitudes et des événements probabilistes. De plus, cette approche permet un premier tri de causalité [36]. Luu et coll. [37] n'a pas considéré le risque comme un attribut du projet ; ils l'ont plutôt modélisé comme la probabilité de retard du projet de construction. De plus, le Bayesian Belief Network (BBN) modélise les relations entre les risques provoquant un retard du projet et quantifie la probabilité d'un tel retard. Plusieurs méthodes sont utilisées pour identifier les facteurs de sécurité et de risque à l'exception du BN, telles que l'arbre de défaillances (FT), le modèle nœud papillon, le SVM (Support Vector Machine) et l'ANN (Artificial Neural Networks). Parmi ceux-ci, les BN sont reconnus pour leur efficacité dans l'évaluation quantitative et dans l'articulation de connaissances incertaines [29,38-41].

Le BN est utilisé par de nombreux chercheurs dans l'analyse de la sécurité et des risques dans les projets de construction. Xue et coll. [11] adoptent le BN pour identifier les facteurs critiques et les facteurs sensibles de la sécurité de la construction. Il est également utilisé pour réaliser l'évaluation des risques sur le cycle de vie de la déflexion de la paroi moulée, y compris le contrôle pré/pendant/post-accidentel [36]. De plus, Zhang et al. [4] ont développé la méthode d'analyse BN pour réaliser le raisonnement déductif et abductif afin d'augmenter la probabilité de réussite d'un projet dans un environnement de site imprévu et complexe. Dans cette recherche, le BN est appliqué pour analyser en permanence les facteurs causaux spécifiques des accidents de construction, la relation causale entre les facteurs et leurs distributions de probabilité conditionnelles.

Bien que la méthode BN-AHP soit largement appliquée dans la gestion des risques, tels que les catastrophes maritimes [42] et l'industrie minière [41], elle est rarement utilisée dans l'industrie de la construction en raison de sa complexité. Cependant, l'identification des risques potentiels est cruciale pour les chefs de projet afin de favoriser une gestion plus résiliente et durable des projets de construction. Dans cette recherche, la méthode innovante est proposée pour générer en temps réel à la fois la probabilité de risque potentiel et la distribution des facteurs de risque, en tirant parti de l'intégration du BN et de l'A

3. Méthodologie

La méthodologie de cette recherche consiste en la collecte de données, un modèle basé sur BN-AHP processus d'établissement et de vérification (voir Figure 1). Tout d'abord, l'échantillon et la vérification les données de cette recherche sont collectées à partir des rapports de sécurité de l'industrie de la construction en Chine continentale. Ces rapports sont publiés sur les sites officiels et pour éliminer les préjugés, seuls les accidents ordinaires causés par des problèmes de sécurité dans la construction sont pris en compte. Les rapports fournir des détails complets sur les chaînes d'accidents, y compris les accidents directs et indirects facteurs contribuant aux accidents, évitant ainsi les conjectures subjectives et améliorant précision du modèle. Ces informations structurelles extraites sont ensuite synthétisées pour des intégration dans le cadre BN et AHP.

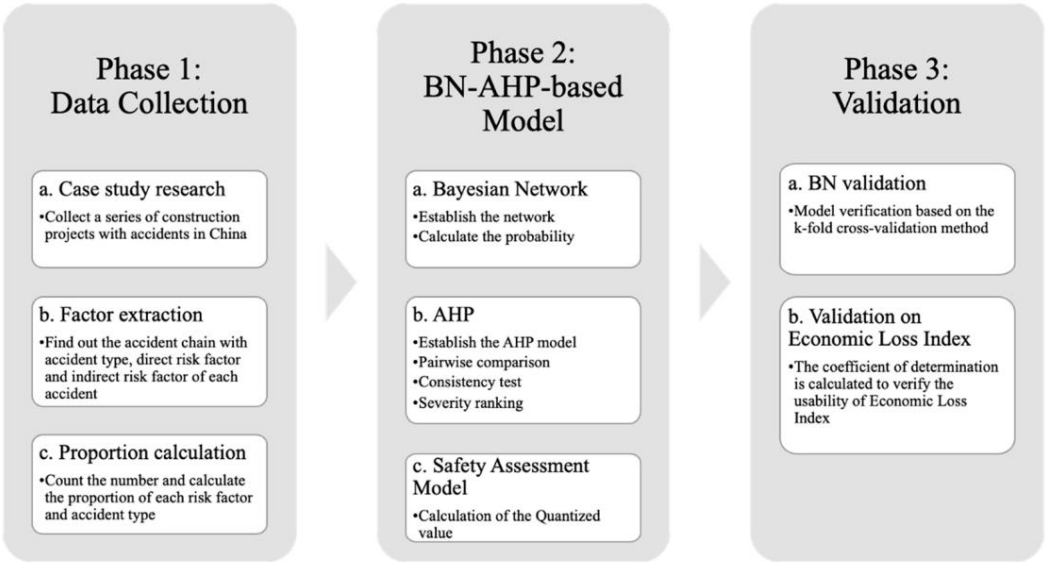
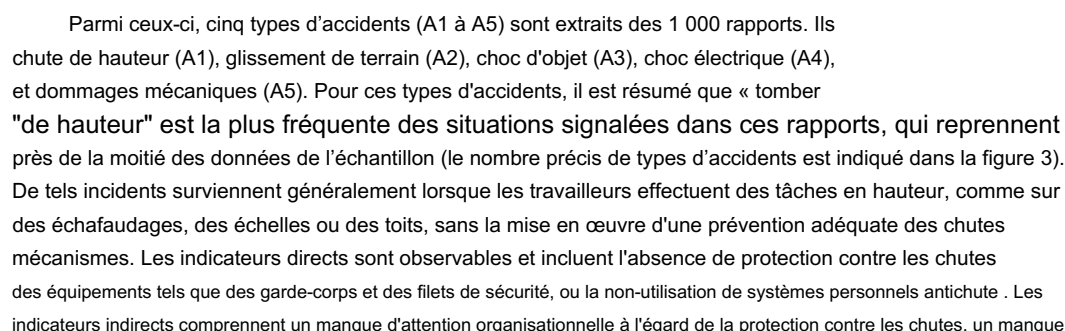


Figure 1. Méthodologie de recherche.

4. L'établissement du modèle d'évaluation des risques BN-AHP. Dans un deuxième temps, les données collectées sont mises dans le BN pour calculer la probabilité. risque et les types Selon la formule bayésienne ci-dessous (équation (1)), les données collectées englobent- 4.1. Les facteurs de La collecte des données de cette recherche vise à identifier la chaîne d'accidents, facteur et facteur indirect. De plus, cela implique de compter le nombre et la proportion de chaque formule du réseau bayésien de l'équation (1) [38]. facteur de risque et type d'accident à partir des rapports d'accidents collectés en Chine. Ces rapports $P(B|A)P(A)$ sont compilés à partir de sites Web gouvernementaux, de bases de données d'incidents de sécurité dans la construction, entretiens avec des chefs de projet et des responsables sécurité. Environ 1 000 rapports d'incidents de sécurité dans la construction devraient être collectés pour les données initiales, qui seront utilisées $P(X_1 = x_1, \dots, X_n = x_n) = \prod_{j=1}^n P(X_j = x_j | X_{j+1} = x_{j+1}, \dots, X_n = x_n)$ pour la formation à la modélisation et la validation croisée K-fold. (1)

Les rapports d'accidents de sécurité collectés sont collectés sur les sites Web officiels du A = facteur de risque : B = type d'accident : $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ = variables aléatoires. gouvernement [44]. Chaque accident est décrit dans un rapport de sécurité sur un accident particulier. Dans l'étape suivante, la méthode de comparaison par paires AHP est utilisée. L'évalué type avec ses facteurs directs et indirects. La zone distribuée des rapports est représentée par des critères dérivés du cadre 4M1E, qui implique la collecte de données via la question- Figure 2 et ces rapports ont été utilisés pour la simulation de création de modèles. questionnaires reflétant l'expérience pratique. Par conséquent, le classement de la gravité de l'accident les types sont générés. Sur la base des résultats des méthodes BN et AHP, l'indice de perte de chaque facteur indirect est calculé en multipliant la probabilité de provoquer chaque type d'accident et la gravité de chaque type d'accident. Parmi ceux-ci, la probabilité d'être à l'origine de chaque facteur indirect qui conduit à chaque type d'accident est calculé en fonction du BN et de la gravité de chaque accident le type est classé par la comparaison par paire AHP. Il est prouvé que les facteurs indirects sont généralement générées par les vulnérabilités de gestion et pourraient être gérées par la sécurité du site ou des chefs de projet dans une certaine mesure. Quantifier l'indice de perte des facteurs indirects est plus précieux que de quantifier les facteurs directs, qui pourraient soutenir la gestion niveau avec la prise de décision dans des conditions pratiques.

La figure 2 et ces rapports ont été utilisés pour la simulation de création de modèles.



Les dangers de travail en hauteur et l'absence de connaissances complètes sur les risques des travaux de terrain (A2) dans le secteur de la construction sont généralement préétablis par les excavations ou les mouvements naturels du terrain qui constituent également un risque dans la construction. Les incidents de terre, l'affaissement du sol ou l'intégrité compromise des structures de soutènement des excavations des travailleurs par des objets (A3) sont récurrents dans les environnements où les matériaux sont soit déplacés au-dessus du niveau du sol. Ce risque se caractérise par des outils ou des matériaux non sécurisés, susceptibles de tomber et par le manque de structures de protection telles que des filets à débris ou des coffrages. De plus, les blessures par choc électrique (A4) sont une préoccupation majeure dans le secteur de la construction et sont souvent la conséquence d'un contact avec des sources d'énergie électrique ou d'un équipement défectueux. Les dommages mécaniques (A5) dans la construction sont souvent des défaillances de systèmes mécaniques ou des dysfonctionnements de machines, entraînant de graves blessures par écrasement ou des amputations traumatiques.

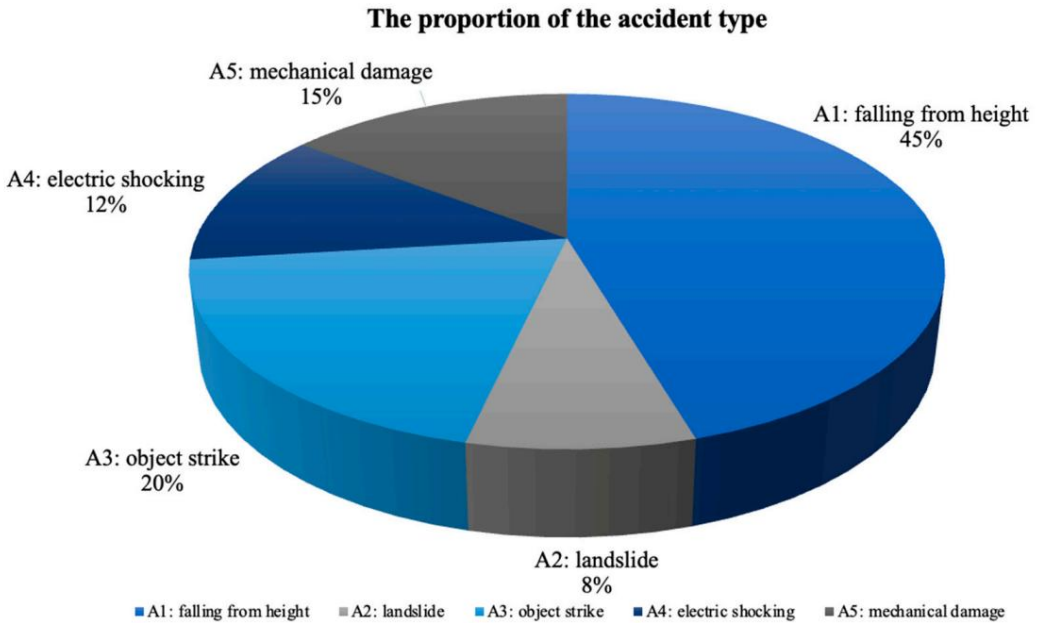


Figure 3. La proportion du type d'accident.

Sur la base de l'analyse des cinq types d'accidents, l'annotation des conséquences directes et indirectes est présentée dans le tableau 2. Elle est également extraite de l'accident de production de sécurité. Les facteurs indirects sont présentés dans le tableau 2. Ils sont également extraits du rapport sur la sécurité des produits publié par le gouvernement au lieu d'être subjectifs et résumés par les auteurs pour rapport émis par le gouvernement plutôt que subjectif et résumé par une recherche garantissant la neutralité. Dans chaque rapport, il y a généralement un à deux facteurs directs et certains facteurs indirects qui ont causé l'accident signalé. Dans cet article, le direct autour de trois facteurs indirects qui ont causé l'accident signalé. Dans ce pap, les facteurs sont représentés par D1 à D6 et les facteurs indirects sont présentés par Ind1 à Ind7.

les facteurs sont représentés par D1 à D6 et les facteurs indirects sont indiqués par Ind1 à Ind. Dans le domaine de la sécurité de la construction, les facteurs causatifs des accidents sont le tableau 2. Annotez les facteurs indirects, les facteurs directs et les accidents. reliant les éléments directs et indirects qui forment une tapisserie complexe de facteurs tels que le

Facteur indirect	chantier de construction encombré, l'emploi du personnel
Chantier encombré de l'Ind1	D1 pas de port d'équipement de protection
Ind2 pas de qualification en construction	Opération illégale D2
Ind3 pas de formation en sécurité	Travaux de terrassement D3
Ind4 pas de fournitures de protection standard	D4 sans permis
Ind5 aucune divulgation de sécurité	Vieillessement du matériau D5
Ind6 aucun système de sécurité terminé	D6 sans protection des bords
Ind7 pas de supervision efficace	

Dans le domaine de la sécurité des chantiers, les facteurs causals des accidents sont multiples, reliant les éléments directs et indirects qui forment une tapisserie complexe de risques. Indirect des facteurs tels que le chantier de construction encombré, l'emploi du personnel manquant des compétences requises qualifications en construction, l'absence de formation critique en matière de sécurité et un déficit de normes les fournitures de protection manifestent une négligence fondamentale envers une culture de sécurité. Le le manque de divulgations de sécurité exacerbe ce scénario en dissimulant des informations cruciales concernant les dangers existants, tandis que l'absence d'un système de sécurité complet et efficace la supervision ne parvient pas à arrêter cette dérive vers des pratiques dangereuses. À l'inverse, les facteurs directs réduisent plus près des causes immédiates des accidents. L'absence de protection essentielle l'équipement rend les travailleurs vulnérables aux dangers bruts de l'environnement de la construction. De plus, les opérations illégales sans licences appropriées, ignorant souvent les mesures de sécurité liées à la vitesse, préparer le terrain à des accidents graves. Ces facteurs directs sont aggravés par l'utilisation de matériaux souffrant de détériorations liées à l'âge et de l'omission inquiétante des bords protection lors des travaux en hauteur, chacun étant un signe avant-coureur potentiel d'une défaillance catastrophique. Ensemble, ces facteurs soulignent une faille périlleuse dans la gouvernance de la sécurité, une brèche dans l'édifice de contrôle des dangers qui pourrait précipiter une gamme d'accidents, du mineur au mortel, au sein du secteur de la construction. Une atténuation efficace dépend donc d'un mélange harmonieux de une application stricte des règles de sécurité, une éducation généralisée à la sécurité et un engagement inébranlable engagement en faveur d'une culture de sécurité proactive – chacune étant un pilier indispensable à la sauvegarde de la bien-être du personnel de construction.

4.2. Analyse des données avec les modèles BN et AHP

4.2.1. Réseau bayésien (BN)

BN est également connu sous le nom de modèles Belief Networks ou DAG. Il convient à la prise de décision qui dépend conditionnellement de plusieurs facteurs de contrôle. En attendant, cela peut faire déductions à partir d'un grand nombre de connaissances et d'informations différentes. D'après les données recueillies rapports d'accidents de production de sécurité publiés par les sites Web du gouvernement, les chaînes causales de

Bâtiments 2023, 13, x POUR EXAMEN PAR LES

9 sur 18

Le réseau DAG (voir Figure 4) est établi, comprenant les huit réseaux indirects ci-dessus. facteurs, six facteurs directs et cinq types d'accidents collectés au cours de la phase 1.

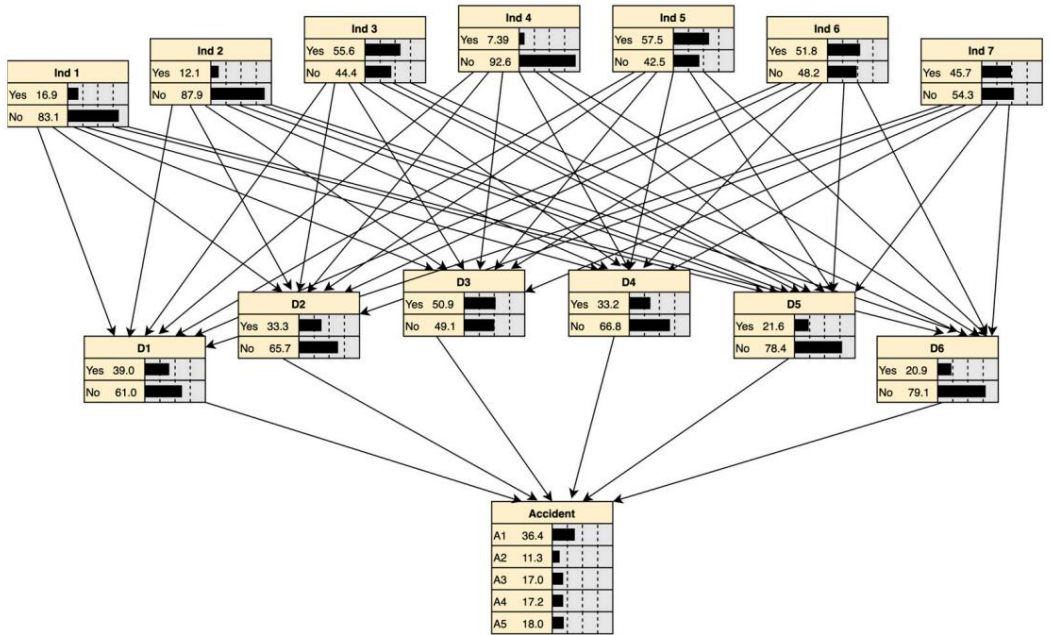


Figure 4. Un exemple de DAG.

Selon la méthodologie de recherche, la probabilité de chaque facteur indirect doit être calculée en important les données collectées (facteurs de risque et types de projets) dans BN. Comme le montre le tableau 3, la probabilité que chaque facteur de risque provoque un accident est générée.

Tableau 3. Tableau de distribution de probabilité (%).

Selon la méthodologie de recherche, la probabilité de chaque facteur indirect doit être calculé en important les données collectées (facteurs de risque et types de projets) dans BN. Comme montré dans le tableau 3, la probabilité que chaque facteur de risque provoque un accident est générée.

Tableau 3. Tableau de distribution de probabilité (%).

	A1	A2	A3	A4	A5
Ind1	38.2	13.9	15.3	17.7	15,0
Ind2	27.4	17,0	17.9	21.2	16.4
Ind3	40.3	11.8	18,8	17,0	12,0
Indice4	35.3	12.7	17.3	21.4	13.3
Indice5	39,0	9.3	14.4	14.3	23,0
Indice6	28.4	14.3	22,5	19.6	15.2
Indice7	39.4	12.2	15,8	17.2	15.4

4.2.2. Processus de hiérarchie analytique (AHP)

Chaque projet ayant ses caractéristiques, il ne pourrait pas y avoir le même incident de sécurité.

Même pour le même type d'incident de sécurité, la perte ne sera pas la même. Donc, il est difficile d'effectuer une méthode de calcul objective pour évaluer la gravité. AHP est un méthode d'évaluation subjective, qui montre l'avantage de tirer pleinement parti des avis d'experts connaissances en évaluation des incidents de sécurité. Dans cette étude, le modèle AHP consiste en quatre étapes.

Les données entrées dans la comparaison par paires sont collectées à partir du questionnaire de les praticiens de l'industrie. Il y a 10 praticiens invités à répondre aux questionnaires.

Les informations générales des personnes interrogées sont présentées dans le tableau 4. La conception du

Le questionnaire est basé sur l'évaluation de deux des cinq critères (4M1E) pour chaque

type d'accident (A1 à A5). Les praticiens invités noteront la sévérité des critères

à chaque type d'accident en utilisant la plage de notation de 1 à 9. Parmi ceux-ci, 9 montre le plus grave

raison provoquant l'accident correspondant. Par exemple, si les praticiens doivent

pour évaluer le niveau de gravité « Homme » et « Matériel » à l'origine du A1, l'exemple de question est

« Selon vous, quelle est la gravité des chutes causées par « l'Homme » et le « Matériel » ?

L'ensemble complet des questionnaires est omis dans cet article.

Tableau 4. Informations générales sur les personnes interrogées.

N° de Interviewé	Position	Période de travail pertinente pour les travaux de sécurité du chantier (année)
1	Chef de projet	7
1	Chef de projet	dix
1	Surveillant de chantier	2
2	Surveillant de chantier	6
2	Chef de la sécurité	7
3	Chef de la sécurité	5

Grâce à cette méthode, le modèle de structure hiérarchique est établi et affiché dans la figure 5. Les accidents sont sélectionnés par causes et types, puis AHP est construit à partir de ces éléments.

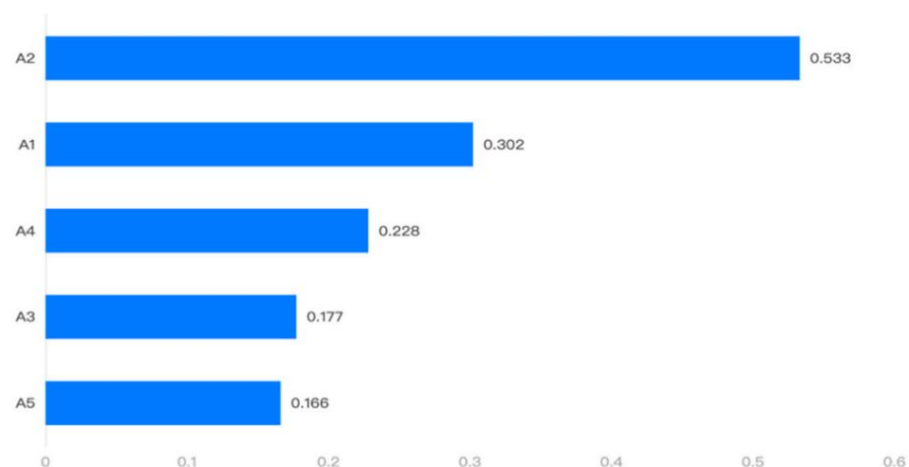


Figure 6. Résultat du modèle AHP.

3. Test de cohérence

4.2.3. Évaluation des risques de sécurité dans la

construction AHP est utilisé pour effectuer des tests de cohérence afin de garantir la cohérence logique des jugements et évitent les erreurs de prise de décision causées par des facteurs subjectifs déraisonnables. Dans la méthode AHP, λ est considérée comme la valeur propre maximale pour calculer la probabilité multipliée par la gravité (voir l'équation (4)). L'IC peut être défini dans l'équation (2).

Équation (2) Test de cohérence

$$IC = \frac{\lambda - n}{n(n-1)} \quad (n = 1, 2, \dots, 7) \quad (4)$$

Sur la base du résultat ci-dessus de la méthode BN-AHP, l'indice de perte de chaque facteur indirect peut être calculé sur la base de l'équation proposée. Comme le montre la figure 7, le résultat du modèle calculé montre le degré de préjudice que chaque facteur de risque peut causer dans un environnement donné. De plus, pour une matrice d'un ordre spécifique, un indice aléatoire (RI) de référence est adopté (CR) le plus élevé. Le rapport de cohérence (CR) peut être déterminé à l'aide de cette valeur, comme le montre l'équation (3). $CR < 0.1$, le résultat est acceptable.

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (3)$$

où CR = rapport de cohérence. RI = Indice aléatoire.

4. Classement de gravité

Sur la base des résultats précédents, le classement de la gravité peut être généré via saisir les données collectées dans le modèle AHP (voir Figure 6).

4.2.3. Évaluation des risques de sécurité dans la construction

Dans cette recherche, les risques de sécurité de la construction sont évalués avec le référentiel du indice de perte quantifié. Le résultat de l'indice de perte pour chaque facteur est calculé à travers le probabilité multipliée par la gravité (voir l'équation (4)).

Équation (4) Indice de perte de chaque facteur indirect [4,19].

$$\text{Indice de perte par facteur} = \text{Indn } P(A1, A2, \dots, A5) \times S^T (A1, A2, \dots, A5) \quad (n = 1, 2, \dots, 7) \quad (4)$$

Sur la base du résultat ci-dessus de la méthode BN-AHP, l'indice de perte de chaque Le facteur peut être calculé sur la base de l'équation proposée. Comme le montre la figure 7, le résultat du modèle calculé montre le degré de préjudice que chaque facteur de risque peut causer dans un accident de sécurité. Cela indique que l'Ind3 (manque de formation en sécurité dans la construction) a le Figure 7. Indice de perte de chaque indicateur.

(4)

Type d'accident	A1	A2	A3	A4	A5
AUC (G1)	0,96	0,83	0,91	0,81	0,95
AUC (G2)	0,91	0,84	0,90	0,66	0,89
ASC G3	0,95	0,88	0,92	0,77	0,94

L'AUC est proposée pour représenter une mesure pour l'évaluation de la performance d'un modèle de classification binaire. Lorsque la valeur de l'AUC se rapproche de 1, cela indique une discrimination parfaite, et si elle se rapproche de 0,5, cela suggère qu'elle n'est pas meilleure que la classification aléatoire [43]. En construisant le modèle de validation et en calculant la valeur de l'AUC, la qualité du Le modèle peut être évalué. Si la valeur de l'AUC est supérieure à 0,75, cela signifie que le modèle peut être accepté. Grâce à des tests, la valeur moyenne de l'AUC peut être calculée après avoir parcouru cinq groupes (voir tableau 7). Grâce au calcul, il montre que la valeur moyenne de l'AUC du Le modèle est de 0,85, ce qui est supérieur à 0,75. En conséquence, ce modèle peut être considéré comme efficace.

Tableau 7. Résultat de l'AUC.

Type d'accident	A1	A2	A3	A4	A5
AUC (G1)	0,96	0,83	0,91	0,81	0,95
ASC (G2)	0,91	0,84	0,90	0,66	0,89
ASC (G3)	0,95	0,88	0,92	0,77	0,94
AUC (G4)	0,94	0,83	0,83	0,68	0,90
ASC (G5)	0,94	0,79	0,90	0,66	0,89

4.3.2. Validation de l'utilisabilité de l'indice de perte

Il y a 30 incidents de sécurité dans la base de données qui sont sélectionnés au hasard pour valider l'utilisabilité de l'indice de perte. Les facteurs potentiels dans chaque cas sont identifiés et la perte économique est calculée par l'indice de perte. Par la suite, une analyse comparative est menée entre les valeurs prédites du modèle et la perte économique dans les projets réels. Et le résultat présente une corrélation linéaire entre eux.

Dans le processus de validation du modèle de cette étude, le test t bilatéral et le coefficient de détermination (R2) sont utilisées pour évaluer la signification statistique de la relation entre les variables et le pouvoir explicatif du modèle (tableau 8). Concrètement, à travers un test t bilatéral, à un niveau de signification de 0,05, une valeur p est obtenue qui est inférieure à la seuil de signification standard, qui est de $1,51 \times 10^{-21}$. Ce résultat indique que la la moyenne de l'échantillon est significativement différente de la moyenne supposée de la population. Au même temps, la valeur t critique correspondante est de 2,0453, vérifiant ainsi l'importance de la résultats statistiques.

Tableau 8. Test t : appariement de deux échantillons pour les moyennes.

	Variable 1	Variable 2
Signifier	27.72146967	100,2
Variance	0.404712386	252.16552
Observations	30	30
Corrélation de Pearson	0.77709127	
Moyenne hypothétique	0	
Différence df		
t	29	
Stat p	-25.79380293	
(T ≤ t) unilatéral t	$7,53 \times 10^{-22}$	
Critique unilatéral p	1.699127027	
(T ≤ t) bilatéral t	$1,51 \times 10^{-21}$	
Critique bilatéral	2.045229642	

De plus, le R2 du modèle est de 0,6039 (voir Figure 9), ce qui indique que le coefficient indépendant les variables expliquent 60,39% de la variabilité de la variable dépendante, montrant la corrélation entre les variables explicatives du modèle. Par conséquent, combiné aux résultats du test t bilatéral et de l'analyse R2, ce modèle de recherche est statistiquement significatif et démontre un bon pouvoir explicatif, établissant une base solide pour des réflexions théoriques ultérieures. exploration et application pratique. Les résultats de la validation démontrent son potentiel en tant que outil fiable pour prévoir la perte de risque sur les chantiers de construction dans des conditions pratiques.

df	29
t Statistique	-25.79380293
p (T ≤ t) unilatéral t	7,53 × 10 ⁻²²
Critique unilatéral p	1.699127027
(T ≤ t) bilatéral t	1,51 × 10 ⁻²¹
Critique bilatéral	2.045229642

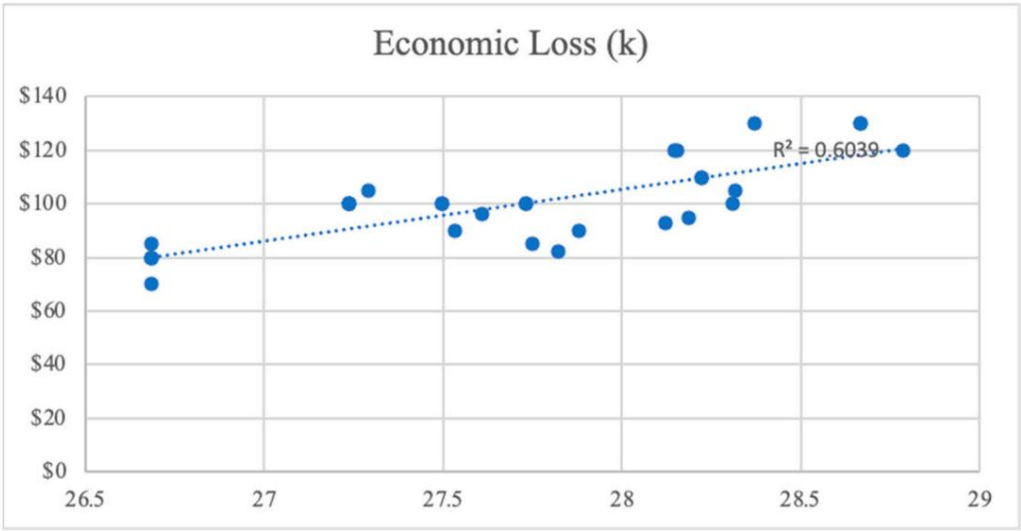


Figure 8. Une corrélation linéaire entre la perte économique (k) dans les projets de construction et la prévision Figure 9. La

Cette étude de cas témoigne de l'utilité pratique du modèle BN-AHP, en posant une base prometteuse pour son application dans la gestion des risques de sécurité et la prévision des pertes dans divers contextes humains. À l'avenir, il est prévu de poursuivre les recherches afin d'améliorer les résultats de la recherche en matière de sécurité et de réduire les pertes. Les données de la recherche peuvent être améliorées en ajoutant plus de données.

5. Résultats

Cette recherche vise à fournir un modèle d'indice de perte de divers indicateurs de risque pour la sécurité. praticiens du management pour optimiser leur stratégie de gestion. Selon le modèle résultats de la figure 7, Ind3 (manque de formation en sécurité dans la construction) obtient le score le plus élevé à 15,38, ce qui indique qu'il s'agit du facteur le plus nocif pour les projets de construction. La plupart des ressources sont Il a été suggéré d'investir dans la formation des praticiens en matière de sécurité afin de réaliser des gestion de la sécurité. Ind5 (aucune divulgation de sécurité), qui est de 15,16, se classant à la deuxième place, indique que le manque de divulgation efficace en matière de sécurité conduira souvent les travailleurs de la construction à travailler selon l'expérience, en ignorant la particularité des différents projets.

6. Discussion

6.1. Implications et contribution managériales

Cette étude offre des implications managériales substantielles et contribue de manière significative au domaine de la gestion de la sécurité dans la construction. En introduisant un modèle d'indice de perte qui quantifie l'impact de divers indicateurs de risque, la recherche constitue un outil essentiel pour la sécurité praticiens de la gestion. Ce modèle permet aux praticiens d'affiner leur gestion stratégies pour une efficacité maximale. D'un point de vue stratégique, la solution proposée est précieux pour les responsables de la sécurité, les chefs de projet et les autorités de haut niveau dans l'orchestration une stratégie de gestion de la sécurité plus nuancée et plus efficace. Sa nature dynamique, avec des ajustements en temps réel reflétant les conditions réelles du site, permet une approche adaptative de la sécurité. surveillance. Les données quotidiennes des patrouilles de sécurité et des inspections peuvent être mises à jour pour estimer la perte index en temps réel, permettant un processus de gestion de la sécurité réactif et informé. Cette recherche permet aux chefs de projet et de sécurité de mettre en œuvre des mesures préventives qui sont alignés avec les conditions dynamiques du projet de construction. Il agit comme un système d'aide à la décision, offrant des conseils faisant autorité sur l'allocation des investissements dans la sécurité. mesures susceptibles de générer un rendement plus élevé. Essentiellement, le modèle sert de modèle pragmatique référence pour les autorités, en dirigeant davantage d'investissements vers des initiatives de sécurité qui non seulement atténuer les risques mais également améliorer l'efficacité économique, en soutenant le double objectif de sécurité et la rentabilité dans la gestion des projets de construction.

6.2. Limites et suggestions de recherches futures L'une

des principales limites de l'applicabilité de ce modèle dépend des données spécifiques à une région en Chine, ce qui peut limiter sa généralisabilité à divers milieux géographiques et culturels. Ainsi, il incombe aux efforts de recherche ultérieurs de valider et potentiellement de recalibrer le modèle avec un ensemble de données internationales plus large afin d'authentifier son applicabilité dans des contextes de construction disparates.

En outre, la prédominance des données quantitatives dans le modèle actuel pourrait ne pas rendre compte de la nature multiforme des facteurs humains et des subtilités de la culture organisationnelle dans la gestion des risques. Les recherches futures pourraient tenter d'intégrer des méthodes de recherche qualitatives pour saisir la dynamique nuancée des pratiques de sécurité au sein de l'industrie de la construction.

L'avènement des technologies numériques offre l'opportunité d'affiner la précision prédictive et la réactivité en temps réel du modèle. De futures études pourraient étudier l'intégration de l'intelligence artificielle et des algorithmes d'apprentissage automatique pour générer un cadre de gestion de la sécurité plus avancé, prédictif et adaptatif. De plus, l'algorithme des modèles d'évaluation quantifiée des risques peut être intégré à la plateforme de gestion de projet de construction. La plateforme de construction intelligente est un choix puissant qui peut prendre en charge une gestion rapide de la sécurité. L'intégration de l'indice économique des risques à la plateforme de gestion de projet peut fournir des suggestions de prise de décision intuitives et éclairées aux personnes au niveau de l'autorité.

Enfin, les résultats économiques prévus dans le modèle ne tiennent pas pleinement compte de l'impact social plus large des accidents de construction. Des recherches plus approfondies devraient aller au-delà des mesures économiques pour intégrer les coûts sociétaux et psychologiques associés aux incidents de sécurité dans la construction. La portée élargie fournirait une compréhension plus globale des implications de la sécurité dans la construction et contribuerait au développement de stratégies globales de gestion des risques.

7. Conclusions

Cette recherche propose une solution intégrée pour analyser les risques et fournit le modèle d'indice de perte au profit du niveau de direction avec des conseils optimisés en matière de gestion de la sécurité. Dans cet article, les données sur les accidents réels sont collectées et les facteurs de risque sont extraits sur la base du BN. Dans l'étape suivante, l'AHP est utilisé pour analyser plus en profondeur les facteurs humains, matériels, de gestion et environnementaux. Grâce à la combinaison du BN et de l'AHP, le modèle d'indice de perte dynamique est établi pour fournir des preuves pour la prise de décision dans le processus de gestion de la sécurité. La caractéristique importante de ce modèle est d'évaluer les conditions de sécurité du projet en temps réel sur la base du contenu du journal de travail collecté quotidiennement. En fonction de l'avancement de la construction, le plan de sécurité peut être ajusté dans le temps, triant et prévenant différents risques à différentes étapes du projet. En outre, cela offre également des opportunités d'enrichissement continu du modèle de prévision des risques avec davantage de données saisies dans le secteur de la construction.

Le résultat actuel généré par le modèle proposé dans cette recherche est réalisé avec une taille et une diversité de données limitées. La précision du modèle sera considérablement accrue si davantage d'accidents sont analysés avec divers facteurs de risque. Dans des recherches ultérieures, l'auteur élargira le pool de recherche et les méthodes Fuzzy BN et Fuzzy AHP seront également utilisées pour améliorer le modèle. En outre, le prochain objectif de recherche serait le contrôle du budget et de l'allocation des investissements pour la gestion de la sécurité dans le secteur de la construction, sur la base du modèle d'indice de perte de la recherche actuelle. Dans le même temps, ce modèle serait combiné avec la théorie du portefeuille de Markowitz. Sur la base des données quantitatives fournies par le modèle, les coûts et les avantages des risques peuvent être comparés. Finalement, le meilleur taux d'investissement dans la gestion de la sécurité est exploré avec le meilleur capital-risque de sécurité pour divers projets de construction.

Dans le contexte de l'avancement de la gestion de la construction et de la gestion des risques de catastrophe, cette étude met l'accent sur le rôle central joué par l'intégration du BN et de l'AHP dans la quantification de la probabilité et de la gravité des risques, calculant ainsi les pertes potentielles. La méthode robuste

proposé dans cette recherche ouvre la voie à un avenir durable et sûr de la gestion de la construction en analysant la valeur multiforme. En élaborant une stratégie pour répondre aux situations dynamiques de sécurité dans la construction, ce modèle permet aux praticiens de prendre des décisions éclairées. À l'avenir, l'approche sera améliorée pour potentiellement bénéficier aux projets vers des avenues qui promettent une valeur accrue et une réduction des pertes, favorisant ainsi un paysage économiquement viable et socialement bénéfique à long terme.

Contributions des auteurs : Conceptualisation, LX et YW ; Méthodologie, LX ; Validation, LX ; Analyse formelle, LX ; Enquête, LX ; Ressources, LX ; Conservation des données, LX ; Rédaction – ébauche originale, LX ; Rédaction : révision et édition, LCMT et YW ; Visualisation, LX et YW ; Supervision, LCMT Tous les auteurs ont lu et accepté la version publiée du manuscrit.

Financement : Cette recherche n'a reçu aucun financement externe.

Déclaration de disponibilité des données : Les données présentées dans cette étude sont disponibles sur demande auprès de l'auteur correspondant. Les données ne sont pas accessibles au public pour des raisons de confidentialité.

Conflits d'intérêts : Les auteurs ne déclarent aucun conflit d'intérêts.

Les références

- Misiurek, K.; Misiurek, B. Méthodologie d'amélioration de la sécurité au travail dans le secteur de la construction sur la base du TWI programme. *Saf. Sci.* **2017**, *92*, 225–231. [\[Référence croisée\]](#)
- Bureau national des statistiques. Rapport d'enquête de suivi sur les travailleurs migrants 2020. Avril 2021. Disponible en ligne : http://www.stats.gov.cn/xxgk/sjfb/zxfb2020/202104/t20210430_1816937.html (consulté le 24 avril 2022).
- Zhang, S.; Loosemore, M.; Sunindijo, RY; Gu, D. Une enquête sur le climat de sécurité dans les grands projets de construction chinois. *Int. J. Constr. Gérer.* **2021**, *23*, 1365–1375. [\[Référence croisée\]](#)
- Zhang, L.; Wu, X.; Skibniewski, MJ; Zhong, J.; Lu, Y. Analyse des risques de sécurité basée sur un réseau bayésien dans les projets de construction. *Fiable. Ing. Système. Saf.* **2014**, *131*, 29–39. [\[Référence croisée\]](#)
- Croc, D.; Shen, Q.; Wu, S.; Liu, G. Un cadre complet pour évaluer et sélectionner un échafaudage approprié basé sur processus de hiérarchie analytique. *J. Saf. Rés.* **2003**, *34*, 589–596. [\[Référence croisée\]](#) [\[Pub Med\]](#)
- Fu, G.; Cao, J.-L.; Zhou, L.; Xiang, Y.-C. Étude comparative du HFACS et des modèles de causalité des accidents 24Model. *Animal de compagnie. Sci.* **2017**, *14*, 570–578. [\[Référence croisée\]](#)
- Wang, B.; Wu, C. L'informatique de sécurité en tant que nouveau domaine prometteur et durable de la science de la sécurité à l'ère de l'information. *J. Nettoy.* **2020**, *252*, 119852. [\[Réf. croisée\]](#)
- Lyu, Q.; Fu, G.; Wang, Y.; Li, J.; Han, M.; Peng, F.; Yang, C. Comment la théorie des causes des accidents peut faciliter une gestion intelligente de la sécurité : Une application du 24Model. *Processus Saf. Environ. Prot.* **2022**, *162*, 878–890. [\[Référence croisée\]](#)
- Zadeh, VZ; Patnaik, A. Modélisation par éléments finis de la réponse dynamique d'un pont en béton armé composite pour la structure Surveillance de la santé. *Int. J. Adv. Structure. Ing.* **2014**, *6*, 2. [\[Réf. croisée\]](#)
- Feng, Q.; Sha, S.; Dai, L. Modèle d'analyse de survie bayésienne pour la prévision des défaillances des soudures circonferentielles. *Appl. Sci.* **2019**, *9*, 1150. [\[Réf. croisée\]](#)
- Xue, N.; Zhang, J.; Zhang, W.; Zhao, T. Recherche sur les causes des accidents de sécurité dans la construction à l'aide du réseau bayésien. *J. Civ. Ing. Gérer.* **2021**, *38*, 176–194.
- Ge, J.; Zhang, Y.; Chen, S.; Xu, K.; Yao, X.; Li, J.; Liu, B.; Yan, F.; Wu, C.; Li, S. Modèles de causalité des accidents développés en Chine entre 1978 et 2018 : Bilan et comparaison. *Saf. Sci.* **2022**, *148*, 105653. [\[Réf. croisée\]](#)
- Goerlandt, F.; Khakzad, N.; Reniers, G. Validité et validation de l'analyse quantitative des risques liés à la sécurité : une revue. *Saf. Sci.* **2017**, *99*, 127–139. [\[Référence croisée\]](#)
- Mao, Y.; Xu, T. Recherche de l'effet de 4M1E sur la qualité de l'ingénierie basée sur un modèle d'équation structurelle. *Système. Ing. Procédure* **2011**, *1*, 213–220. [\[Référence croisée\]](#)
- Li, P. Sur la base de la méthode AHP, analysez les facteurs relatifs à la qualité du projet de construction. *AMR Adv. Maître. Rés.* **2013**, *838–841*, 3151–3155. [\[Référence croisée\]](#)
- Tian, HW Recherche sur la gestion de la sécurité de la construction des immeubles de grande hauteur basée sur le modèle d'évaluation de la hiérarchie grise. *AMR Adv. Maître. Rés.* **2014**, *919–921*, 1477–1481. [\[Référence croisée\]](#)
- Zhang, W.; Zhang, X.; Luo, X.; Zhao, T. Modèle de fiabilité et identification des facteurs critiques de la gestion de la sécurité dans la construction basé sur une pensée systémique. *J. Civ. Ing. Gérer.* **2019**, *25*, 362–379. [\[Référence croisée\]](#)
- Zhang, L.; Skibniewski, MJ; Wu, X.; Chen, Y.; Deng, Q. Une approche probabiliste pour l'analyse des risques de sécurité dans la construction du métro. *Saf. Sci.* **2014**, *63*, 8–17. [\[Référence croisée\]](#)
- Kim, J.-M.; Kim, T.; Fils, K.; Bae, J.; Son, S. Développement d'une évaluation quantitative des risques utilisant des indicateurs de risque pour prédire les dommages économiques sur les chantiers de construction en Corée du Sud. *J. Archit asiatique. Construire. Ing.* **2019**, *18*, 472–478. [\[Référence croisée\]](#)
- Apostolakis, GE Quelle est l'utilité de l'évaluation quantitative des risques ? *Risque anal.* **2004**, *24*, 515–520. [\[Référence croisée\]](#)
- Aven, T.; Heide, B. Fiabilité et validité de l'analyse des risques. *Fiable. Ing. Système. Saf.* **2009**, *94*, 1862–1868. [\[Référence croisée\]](#)

22. Purnus, A. ; Bodea, C.-N. Considérations sur l'analyse quantitative des risques du projet. *Procedia-Soc. Comportement. Sci.* 2013, 74, 144-153.
[Référence croisée]
23. Fung, IWH ; Tam, VWY ; Voilà, TY ; Lu, LLH Développer un modèle d'évaluation des risques pour la sécurité dans la construction. *Int. J.Proj. Gérer.* 2010, 28, 593-600. [Référence croisée]
24. Sanni-Anibire, MO ; Mahmoud, AS; Hassanain, MA; Salami, BA Une approche d'évaluation des risques pour améliorer les performances en matière de sécurité de la construction. *Saf. Sci.* 2020, 121, 15-29. [Référence croisée]
25. Fung, IWH ; Voilà, TY ; Tung, KCF Vers une meilleure fiabilité de l'évaluation des risques : Développement d'un modèle d'évaluation des risques qualitatif et quantitatif (QREM) pour différents métiers des travaux de construction à Hong Kong. *Accident. Anal. Précédent* 2012, 48, 167-184.
[Référence croisée]
26. Franke, A. Analyse des risques en gestion de projet. *Int. J.Proj. Gérer.* 1987, 5, 29-34. [Référence croisée]
27. Taroun, A. Vers une meilleure modélisation et évaluation des risques de construction : aperçus d'une revue de la littérature. *Int. J.Proj. Gérer.* 2014, 32, 101-115. [Référence croisée]
28. Saaty, TL Prise de décision – La hiérarchie analytique et les processus de réseau (AHP/ANP). *J. Syst. Sci. Système. Ing.* 2004, 13, 1–35.
[Référence croisée]
29. Khakzad, N. ; Khan, F. ; Amyotte, P. Analyse de sécurité dans les installations de traitement : Comparaison des approches d'arbre de défaillances et de réseau bayésien. *Fiable. Ing. Système. Saf.* 2011, 96, 925-932. [Référence croisée]
30. Raviv, G. ; Shapira, A. ; Fishbain, B. Analyse basée sur l'AHP du potentiel de risque d'incidents de sécurité : étude de cas de grues dans l'industrie de la construction. *Saf. Sci.* 2017, 91, 298-309. [Référence croisée]
31. Ilbahar, E. ; Karaşan, A. ; Cebi, S. ; Kahraman, C. Une nouvelle approche de l'évaluation des risques pour la santé et la sécurité au travail en utilisant AHP flou pythagoricien et système d'inférence floue. *Saf. Sci.* 2018, 103, 124-136. [Référence croisée]
32. Dağdeviren, M. ; Yüksel, İ. Développer un modèle de processus de hiérarchie analytique floue (AHP) pour la gestion de la sécurité basée sur le comportement. *Inf. Sci.* 2008, 178, 1717-1733. [Référence croisée]
33. Shi, S. ; Jiang, M. ; Liu, Y. ; Li, R. Évaluation des risques de chute de hauteur basée sur l'AHP-fuzzy. *Procedia Ing.* 2012, 45, 112-118.
[Référence croisée]
34. Chan, AHS ; Kwok, Wyoming ; Duffy, VG Utilisation d'AHP pour déterminer les priorités dans un système de gestion de la sécurité. *Ind. Système de données.* 2004, 104, 430-445. [Référence croisée]
35. Aminbakhsh, S. ; Gunduz, M. ; Sonmez, R. Évaluation des risques de sécurité à l'aide du processus de hiérarchie analytique (AHP) pendant la planification et budgétisation des projets de construction. *J. Saf. Rés.* 2013, 46, 99-105. [Référence croisée] [Pub Med]
36. Zhou, Y. ; Li, C. ; Zhou, C. ; Luo, H. Utilisation d'un réseau bayésien pour l'analyse des risques de sécurité liés à la déflexion des parois moulées sur la base de données de terrain. *Fiable. Ing. Système. Saf.* 2018, 180, 152-167. [Référence croisée]
37. Luu, Vermont ; Kim, SY ; Tuan, Nevada ; Ogunlana, SO Quantification du risque de calendrier dans les projets de construction à l'aide de réseaux de croyances bayésiens. *Int. J.Proj. Gérer.* 2009, 27, 39-50. [Référence croisée]
38. Khakzad, N. ; Khan, F. ; Amyotte, P. Analyse quantitative des risques des opérations de forage offshore : une approche bayésienne. *Saf. Sci.* 2013, 57, 108-117. [Référence croisée]
39. Liang, W. ; Zhuang, D. ; Jiang, D. ; Poële, J. ; Ren, H. Évaluation des risques de coulées de débris à l'aide d'un réseau bayésien. *Géomorphologie* 2012, 171-172, 94-100. [Référence croisée]
40. Li, P. ; Chen, G. ; Dai, L. ; Zhang, L. Une approche de réseau bayésien flou pour améliorer la quantification des influences organisationnelles dans les cadres HRA. *Saf. Sci.* 2012, 50, 1569-1583. [Référence croisée]
41. Li, M. ; Wang, D. ; Shan, H. Évaluation des risques liés aux sources d'inflammation des mines à l'aide d'un réseau bayésien flou. *Processus Saf. Environ. Prot.* 2019, 125, 297-306. [Référence croisée]
42. Ping, P. ; Wang, K. ; Kong, D. ; Chen, G. Estimation de la probabilité de réussite de l'évasion, de l'évacuation et du sauvetage (EER) sur la plate-forme offshore en intégrant le réseau bayésien et Fuzzy AHP. *J. Perte Préc. Processus Ind.* 2018, 54, 57-68. [Référence croisée]
43. Gallas, BD One-Shot Estimation de la variance MRMC : AUC. *Acad. Radiol.* 2006, 13, 353-362. [Référence croisée] [Pub Med]
44. Plateforme de divulgation d'informations gouvernementales du Bureau de gestion des urgences du district de Guangzhou Yuexiu. Disponible en ligne : <http://www.yuexiu.gov.cn/gzxyj/gkmlpt/index> (consulté le 8 novembre 2023).