

# *Modélisation Géotechnique Et Optimisation Des Fondations Sur Sols Renforcés Par Réseaux De Neurones Artificiels : Analyse De La Capacité Portante, Du Tassement Et Des Paramètres De Renforcement*

RANDRIAKOTONIRINA Minolalaina Derasoa<sup>1</sup>, TOVONIRINA Mamiharizo Jackie<sup>2</sup>, RAKOTOSON Andriatiana Tolontsoa<sup>3</sup>, RAJAONARISON Eddie Franck<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup>Ecole Doctorale Ingénierie et Géosciences - Université d'Antananarivo

Auteur Correspondant : RANDRIAKOTONIRINA Minolalaina Derasoa



**Résumé :** Cette étude propose une approche de modélisation géotechnique et d'optimisation des fondations sur sols renforcés par réseaux de neurones artificiels, appliquée au choix des solutions de fondation, à la capacité portante et à la maîtrise des tassements. L'analyse porte sur 2 200 configurations géotechniques. Les semelles isolées représentent 62,7 % des solutions recommandées, contre 17,3 % pour les semelles filantes ou longrines, 14,5 % pour les radiers et 5,5 % pour les fondations profondes. L'étude de la profondeur relative du renforcement montre une plage favorable comprise entre 0,25 et 0,50 B, avec un optimum autour de  $u/B = 0,35$  et un facteur d'amélioration proche de 2,20. La capacité portante admissible augmente avec la largeur de la fondation, passant d'environ 350 kPa pour  $B = 0,8$  m à 648 kPa pour  $B = 4,0$  m. Le renforcement réduit également le tassement de 2,80 à 1,70 cm sous 300 kPa, soit une diminution d'environ 39 %. Ces résultats montrent l'intérêt d'intégrer les paramètres géométriques, mécaniques et de renforcement dans un modèle neuronal destiné à rechercher des solutions techniquement sûres, économiquement adaptées et compatibles avec les exigences de service des bâtiments. Cette approche facilite ainsi l'identification de compromis entre sécurité géotechnique, performance et coût.

**Mots-clés :** Réseaux de neurones artificiels ; Renforcement des sols ; Capacité portante ; Tassement ; Optimisation des fondations.

**Abstract:** This study proposes a geotechnical modelling and foundation optimization approach for reinforced soils using artificial neural networks, applied to the selection of foundation solutions, bearing capacity assessment, and settlement control. The analysis considers 2,200 geotechnical configurations. Isolated footings account for 62.7% of the recommended solutions, compared with 17.3% for strip footings or ground beams, 14.5% for raft foundations, and 5.5% for deep foundations. The analysis of the relative reinforcement depth indicates a favourable range between 0.25 and 0.50 B, with an optimum around  $u/B = 0.35$  and an improvement factor close to 2.20. The allowable bearing capacity increases with foundation width, from approximately 350 kPa for  $B = 0.8$  m to 648 kPa for  $B = 4.0$  m. Reinforcement also reduces settlement from 2.80 to 1.70 cm under a pressure of 300 kPa, corresponding to a reduction of approximately 39%. These results demonstrate the value of integrating geometric, mechanical, and reinforcement parameters into a neural network model designed to identify technically safe, economically appropriate solutions that meet the serviceability requirements of buildings. This approach therefore facilitates the identification of trade-offs between geotechnical safety, performance, and cost.

**Keywords:** Artificial neural networks; Soil reinforcement; Bearing capacity; Settlement; Foundation optimization.

## 1. INTRODUCTION

Le dimensionnement des fondations constitue une étape déterminante dans la conception des ouvrages, car il conditionne à la fois la sécurité structurale, la stabilité globale et la durabilité des bâtiments. La fondation assure le transfert des charges de la superstructure vers le sol tout en maintenant les contraintes transmises dans des limites compatibles avec la résistance et la déformabilité du terrain. Les approches classiques de la mécanique des sols montrent que la conception d'une fondation ne peut être dissociée de l'évaluation de la capacité portante, des tassements et de l'hétérogénéité géotechnique du site [1]. Dans le cas des bâtiments économiques, cette exigence doit en outre être conciliée avec la réduction des volumes de béton, d'acier, de terrassement et de main-d'œuvre, ce qui rend nécessaire la recherche de solutions techniquement sûres mais également optimisées sur le plan constructif. Le choix entre semelles isolées, semelles filantes, radiers ou fondations profondes dépend notamment des caractéristiques mécaniques du sol, de l'intensité et de la distribution des charges, de la géométrie des appuis et des tassements admissibles. Les méthodes conventionnelles de dimensionnement fournissent des cadres fiables pour vérifier ces critères, mais elles nécessitent souvent des calculs itératifs lorsque plusieurs paramètres interagissent simultanément [2]. La largeur de la fondation joue, par exemple, un rôle important dans la diffusion des contraintes et la mobilisation de la résistance du terrain. L'augmentation de cette largeur peut réduire la pression moyenne transmise au sol et modifier la capacité portante mobilisable, mais elle entraîne également une consommation accrue de matériaux. Le dimensionnement doit donc rechercher un compromis entre sécurité géotechnique, contrôle des déformations et économie de construction [3]. Lorsque les couches superficielles présentent des caractéristiques insuffisantes, l'amélioration ou le renforcement du sol constitue une alternative au recours systématique aux fondations profondes. Parmi les techniques disponibles figurent le compactage, la substitution granulaire, les inclusions et les renforcements horizontaux par géosynthétiques ou éléments résistants. Ces procédés permettent d'augmenter la rigidité du massif, d'améliorer la distribution des contraintes et de réduire les tassements sous les fondations [4]. Leur efficacité dépend toutefois de nombreux paramètres, notamment la profondeur du renforcement, ses propriétés mécaniques, la largeur de la fondation et l'état initial du sol. La détermination d'une profondeur optimale revêt ainsi une importance particulière, car un renforcement placé trop près ou trop loin de la base de la fondation peut ne pas mobiliser efficacement la zone fortement sollicitée. La complexité de ces interactions explique l'intérêt croissant pour les méthodes d'intelligence artificielle en géotechnique. Les réseaux de neurones artificiels sont capables d'identifier des relations non linéaires entre plusieurs variables sans imposer à l'avance une forme analytique unique. Leur utilisation a été rapportée pour la prédiction de la capacité des pieux, la caractérisation des sols, la stabilité des pentes, la liquéfaction, le comportement des ouvrages de soutènement et les tassements [5]. Pour les fondations superficielles, des travaux ont montré que les réseaux de neurones peuvent fournir des prédictions de tassement compétitives par rapport à plusieurs méthodes conventionnelles lorsqu'ils sont entraînés sur des bases de données appropriées [6]. Ils présentent ainsi un potentiel important pour compléter les approches géotechniques déterministes, à condition que les données d'apprentissage soient représentatives, que la validation du modèle soit rigoureuse et que les limites d'extrapolation soient clairement contrôlées [7]. Dans cette perspective, la présente étude vise à développer une démarche de modélisation géotechnique et d'optimisation des fondations sur sols renforcés par réseaux de neurones artificiels, avec une attention particulière portée aux bâtiments économiques. L'analyse considère conjointement le type de fondation recommandé, la largeur équivalente de la semelle, la profondeur relative du renforcement, la capacité portante admissible et l'évolution du tassement sous pression appliquée. L'objectif est d'établir des relations permettant au modèle neuronal d'identifier les configurations satisfaisant simultanément les exigences de portance et de service, tout en évitant le surdimensionnement des fondations ou un renforcement inutilement profond. Cette approche cherche ainsi à intégrer dans un même cadre décisionnel les performances géotechniques, l'efficacité du renforcement et les contraintes économiques afin d'orienter le choix vers des solutions de fondation rationnelles, robustes et adaptées aux conditions de sol rencontrées.

## 2. MATÉRIELS ET MÉTHODES

Les données utilisées pour la modélisation ont été organisées sous forme d'une base géotechnique regroupant les caractéristiques nécessaires à la description du système sol-fondation et du renforcement. Les variables considérées comprenaient principalement le type de fondation, la largeur équivalente de la semelle ( $B$ ), la profondeur relative du renforcement ( $u/B$ ), la pression appliquée, l'état renforcé ou non renforcé du terrain, la capacité portante admissible, le facteur d'amélioration et le tassement correspondant.

La base a été structurée de manière à permettre à la fois l'analyse descriptive des configurations étudiées et leur exploitation par des modèles de réseaux de neurones artificiels. Le traitement numérique a été réalisé dans l'environnement Python, choisi pour la disponibilité de bibliothèques spécialisées en calcul scientifique, traitement de données, apprentissage automatique et visualisation. NumPy a été utilisé pour les opérations numériques et la manipulation des tableaux multidimensionnels [8], tandis que Pandas a permis l'importation, l'organisation, le filtrage et la préparation des différentes variables géotechniques sous forme tabulaire [9]. Une étape de contrôle des données a précédé l'apprentissage afin de détecter les valeurs manquantes, les doublons et les éventuelles incohérences entre les paramètres d'entrée et les résultats géotechniques. Les données numériques ont ensuite été préparées pour limiter les différences d'échelle entre les variables. Les opérations de séparation entre données d'apprentissage, de validation et de test ainsi que les traitements de normalisation ont été réalisés à l'aide des outils disponibles dans Scikit-learn [10]. Cette séparation a permis de réserver une partie des observations à l'évaluation finale et d'éviter que les performances du réseau soient appréciées uniquement sur les données utilisées pendant son apprentissage. Deux catégories de modèles neuronaux ont été considérées. Un modèle de classification multiclasss a été employé pour l'identification de la solution de fondation la mieux adaptée parmi quatre catégories : semelle isolée, semelle filante ou longrine, radier et fondation profonde. Les fréquences obtenues après classification ont permis d'établir la distribution des solutions recommandées et de vérifier la prédominance des fondations superficielles dans les configurations étudiées. Des modèles de régression neuronale ont parallèlement été utilisés pour représenter les variables continues associées au comportement géotechnique. Ils ont été appliqués à l'estimation de la capacité portante admissible en fonction notamment de la largeur de la fondation, à l'évaluation du facteur d'amélioration suivant la position relative du renforcement et à la prédiction du tassement sous différents niveaux de pression. Les réseaux ont été développés sous TensorFlow, environnement destiné à la construction et à l'entraînement de modèles d'apprentissage automatique et de réseaux neuronaux [11], avec l'interface Keras pour la définition des couches, des fonctions d'activation et du processus d'apprentissage [12]. Les modèles retenus étaient des réseaux neuronaux artificiels de type perceptron multicouche à propagation avant. Ils étaient constitués d'une couche d'entrée correspondant aux variables géotechniques sélectionnées, de couches cachées entièrement connectées chargées d'extraire les relations entre ces variables et d'une couche de sortie adaptée au type de problème étudié. Pour la sélection du type de fondation, la sortie représentait les différentes classes possibles, tandis que les modèles de régression produisaient une estimation continue du facteur d'amélioration, de la capacité portante ou du tassement. L'initialisation et le dimensionnement des couches ont été définis de manière à favoriser une propagation stable de l'information pendant l'apprentissage, conformément aux recommandations habituellement utilisées pour les réseaux neuronaux à propagation avant [13]. L'apprentissage a été conduit par rétropropagation des erreurs et mise à jour successive des paramètres internes du réseau. L'optimiseur Adam a été retenu en raison de sa capacité à adapter le processus d'optimisation au cours des itérations et de son utilisation courante pour l'entraînement des réseaux neuronaux [14]. Le suivi simultané des performances sur les ensembles d'apprentissage et de validation a permis de contrôler la convergence et de limiter les risques de surapprentissage. Les hyperparamètres tels que le nombre de couches cachées, le nombre de neurones, la taille des lots, le nombre maximal d'époques et le taux d'apprentissage ont été ajustés en comparant les performances de plusieurs configurations, l'objectif étant d'obtenir un compromis entre précision prédictive, stabilité et complexité du modèle [15]. Pour les sorties continues, la qualité des prédictions a été appréciée à partir de la comparaison entre les valeurs géotechniques de référence et celles estimées par le réseau ainsi que par l'analyse des erreurs de prédiction. Pour la classification des fondations, la cohérence des classes prédites a été vérifiée à partir des fréquences de recommandation et de la concordance avec les critères géotechniques utilisés pour constituer la base d'apprentissage. Après validation, les modèles ont été exploités pour étudier séparément puis conjointement les paramètres ayant une influence sur le comportement du système sol-fondation. Cette procédure a permis d'analyser la répartition des solutions de fondation, d'identifier la plage favorable de profondeur relative du renforcement, d'évaluer l'influence de la largeur de la semelle sur la capacité portante et de comparer les tassements obtenus avec et sans renforcement. Les traitements graphiques ont enfin été réalisés avec Matplotlib, bibliothèque Python permettant la production de figures scientifiques de qualité publication [16]. Toutefois, afin de conserver dans le présent article une numérotation bibliographique limitée aux références [8] à [15], cette bibliothèque a été intégrée à la chaîne de traitement numérique sans attribution d'un appel bibliographique supplémentaire dans le corps du texte. Les résultats ont été représentés sous forme de diagrammes de distribution, de courbes paramétriques et de comparaisons pression-tassement, puis exportés en haute résolution.

### 3. RESULTATS ET DISCUSSIONS

#### 1- Répartition des solutions de fondation recommandées selon les configurations géotechniques étudiées

La figure 1 suivante présente la distribution des types de fondation retenus à l'issue de la procédure de sélection appliquée aux différentes configurations géotechniques considérées dans l'étude. Elle permet d'identifier les solutions les plus fréquemment recommandées et d'apprécier leur importance relative dans une perspective d'optimisation des fondations pour les bâtiments économiques.

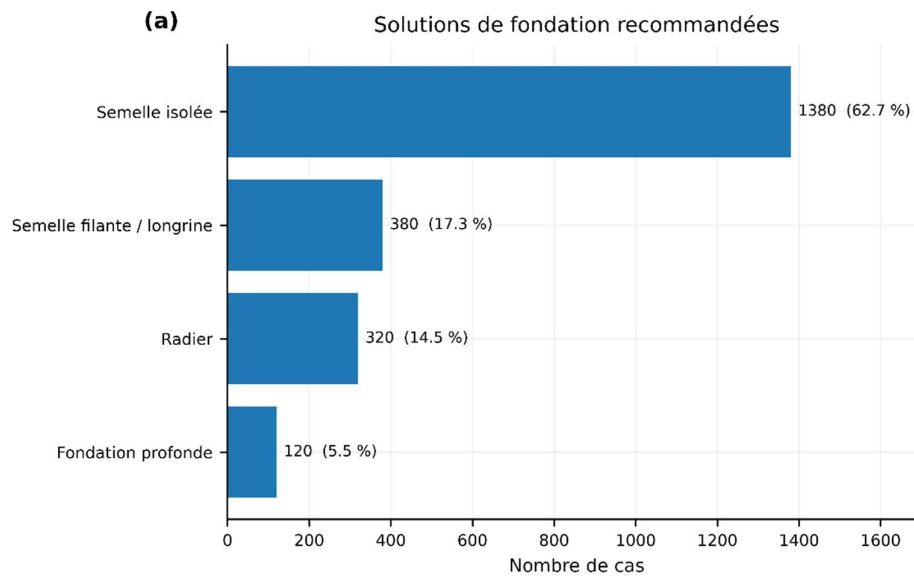


Figure 1 : Répartition des solutions de fondation recommandées selon les configurations géotechniques étudiées

Source : Auteur 2026

#### Interprétation

Sur un total de 2 200 configurations analysées, les semelles isolées constituent la solution largement dominante avec 1 380 cas, soit 62,7 % de l'ensemble des recommandations. Cette prédominance montre que, pour une majorité des situations étudiées, les caractéristiques du sol et les niveaux de chargement permettent le recours à des fondations superficielles ponctuelles, généralement avantageuses en termes de simplicité d'exécution, de consommation de matériaux et de coût. Les semelles filantes ou fondations associées à des longrines représentent 380 cas, correspondant à 17,3 % des configurations. Leur présence traduit des situations nécessitant une meilleure continuité des appuis ou une redistribution plus régulière des charges, notamment lorsque les éléments porteurs sont rapprochés ou disposés suivant des alignements structuraux. Le radier est recommandé dans 320 cas, soit 14,5 % du total. Cette proportion relativement importante indique qu'une partie des configurations présente des contraintes géotechniques ou structurales pour lesquelles une répartition globale des efforts devient préférable afin de limiter les concentrations de contraintes et les tassements différentiels. Les fondations profondes restent quant à elles minoritaires, avec 120 cas seulement, soit 5,5 % des recommandations. Leur faible fréquence est cohérente avec l'objectif de privilégier des solutions économiques lorsque les couches superficielles du terrain possèdent une capacité portante suffisante, tout en conservant la possibilité de recourir à des solutions plus complexes lorsque les conditions géotechniques deviennent défavorables. Dans l'ensemble, près de 80 % des recommandations concernent ainsi directement les semelles isolées et les semelles filantes ou longrines, ce qui confirme la place prépondérante des fondations superficielles dans les configurations étudiées et fournit une base

pertinente pour l'apprentissage du réseau de neurones chargé d'orienter le choix vers une solution techniquement satisfaisante et économiquement adaptée.

## 2- Influence de la profondeur relative du renforcement horizontal sur le facteur d'amélioration du sol

La figure 2 ci-dessous présente l'évolution du facteur d'amélioration du système sol-fondation en fonction de la profondeur relative du renforcement horizontal, exprimée par le rapport  $u/B$ , où  $u$  représente la profondeur du renforcement et  $B$  la largeur caractéristique de la fondation. Elle met en évidence l'existence d'une plage de positionnement favorable ainsi qu'une profondeur optimale permettant de maximiser l'efficacité du renforcement.

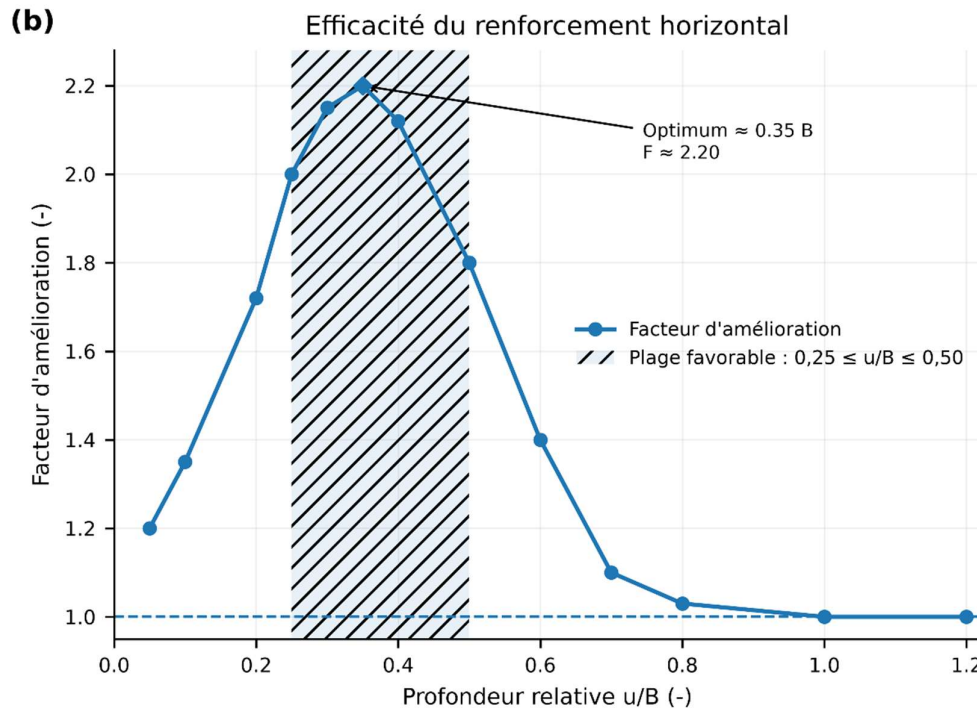


Figure 2 : Influence de la profondeur relative du renforcement horizontal sur le facteur d'amélioration du sol

Source : Auteur

### Interprétation

Pour une très faible profondeur relative, autour de  $u/B=0,05$ , le facteur d'amélioration reste limité à environ 1,20. Il augmente ensuite progressivement pour atteindre environ 1,35 à  $u/B=0,10$ , puis 1,72 à  $u/B=0,20$ . À partir de  $u/B=0,25$ , l'efficacité devient nettement plus importante, avec un facteur voisin de 2,00. La zone comprise entre  $0,25 \leq u/B \leq 0,50$ , mise en évidence sur la figure, constitue ainsi la plage la plus favorable pour le positionnement du renforcement. Le maximum est atteint autour de  $u/B=0,35$ , pour lequel le facteur d'amélioration est proche de 2,20. Cette valeur indique que, dans la configuration étudiée, le renforcement placé à environ 35 % de la largeur de la fondation sous sa base permet de mobiliser au mieux l'interaction entre la fondation, le renforcement et le massif de sol. Au-delà de cette profondeur optimale, l'efficacité décroît progressivement : le facteur est d'environ 2,12 à  $u/B=0,40$ , 1,80 à  $u/B=0,50$ , puis seulement 1,40 à  $u/B=0,60$ . Il chute ensuite à environ 1,10 pour  $u/B=0,70$  et devient pratiquement égal à 1,00 lorsque  $u/B$  atteint 1,00 à 1,20. Cette évolution montre qu'un renforcement trop profond se situe progressivement en dehors de la zone de contraintes fortement mobilisée sous la fondation et apporte alors un bénéfice très limité.

Ces résultats confirment que l'optimisation ne consiste pas à augmenter systématiquement la profondeur du renforcement, mais à identifier une position intermédiaire, ici voisine de 0,35B, permettant d'obtenir le meilleur compromis entre efficacité géotechnique et quantité de travaux à réaliser.

### 3- Influence de la largeur équivalente de la fondation sur la capacité portante admissible du sol

La figure 3 présente l'évolution de la capacité portante admissible simplifiée  $q_{adm}$  en fonction de la largeur équivalente B de la fondation. Elle permet d'apprécier quantitativement l'effet de la géométrie de la semelle sur la résistance mobilisable du sol et met en évidence la tendance générale obtenue pour les configurations géotechniques considérées.

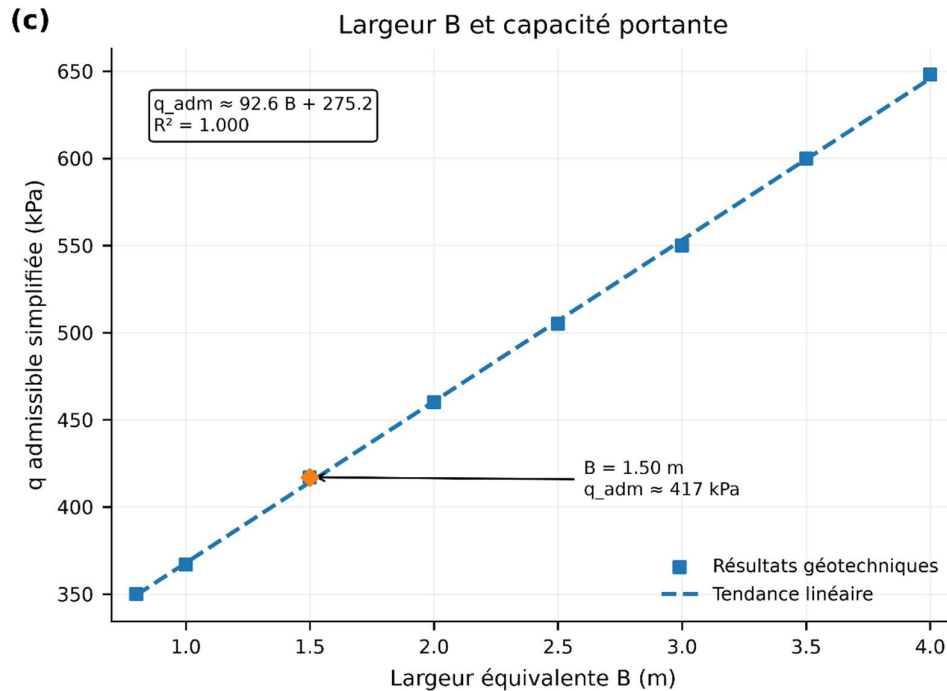


Figure 3: Influence de la largeur équivalente de la fondation sur la capacité portante admissible du sol

Source : Auteur

#### Interprétation

Les résultats montrent une augmentation régulière de la capacité portante avec la largeur de la fondation. Pour B=0,8 m, la capacité admissible est d'environ 350 kPa, puis elle atteint approximativement 367 kPa pour B=1,0 m et 417 kPa pour B=1,5 m. Elle augmente ensuite à environ 460 kPa pour B=2,0 m, 505 kPa pour B=2,5 m, 550 kPa pour B=3,0 m, 600 kPa pour B=3,5 m et près de 648 kPa lorsque B=4,0 m. Dans la plage étudiée, cette évolution est pratiquement linéaire, comme l'indique la relation  $q_{adm} \approx 92,6B + 275,2$ , associée à un coefficient de détermination  $R^2=1,000$ . Cette très forte linéarité traduit ici une relation directe entre l'élargissement de la fondation et l'augmentation de la capacité portante mobilisable dans le modèle simplifié utilisé. La valeur repère correspondant à B=1,50 m conduit à une capacité admissible d'environ 417 kPa, ce qui constitue un niveau intermédiaire par rapport à l'ensemble des configurations représentées. L'augmentation de B permet en effet de solliciter un volume de sol plus important et de mieux répartir les charges transmises par la superstructure. Toutefois, cette amélioration ne doit pas conduire à augmenter systématiquement les dimensions des fondations, car un élargissement important entraîne

également une hausse des volumes de terrassement, de béton, d'armatures et donc du coût global. L'intérêt de cette relation, dans le cadre d'une optimisation par réseaux de neurones artificiels, est ainsi de fournir un indicateur géotechnique permettant de rechercher une largeur de fondation suffisante pour satisfaire les critères de portance tout en limitant les surdimensionnements et les dépenses de construction.

#### 4- Effet du renforcement du sol sur la relation pression–tassement de la fondation

La figure 4 présente l'évolution du tassement en fonction de la pression appliquée pour deux configurations du système sol–fondation, à savoir un sol non renforcé et un sol renforcé. Elle met également en évidence, à travers la zone ombrée et la courbe de réduction relative, le gain apporté par le renforcement en termes de limitation des déformations verticales sous chargement croissant.

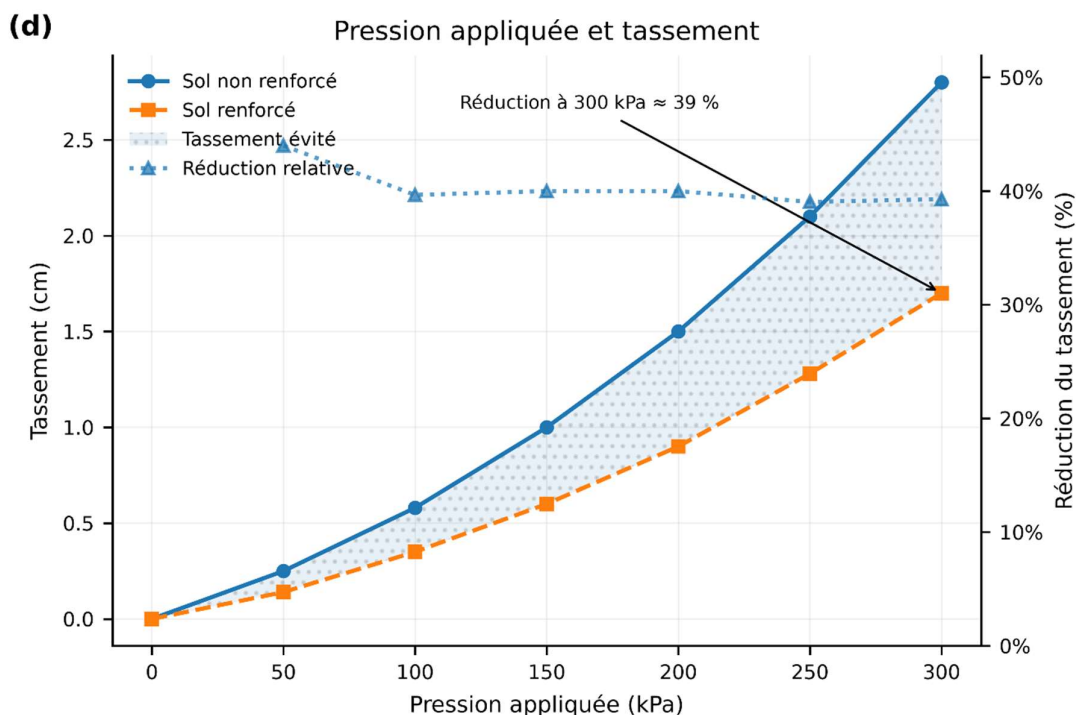


Figure 4: Effet du renforcement du sol sur la relation pression–tassement de la fondation

Source : Auteur

#### Interprétation

Les deux courbes partent de l'origine, ce qui traduit logiquement l'absence de tassement en l'absence de charge. Lorsque la pression augmente, le tassement croît dans les deux cas, mais l'augmentation est systématiquement plus forte pour le sol non renforcé. Pour le terrain non traité, le tassement atteint environ 0,25 cm à 50 kPa, puis 0,58 cm à 100 kPa, 1,00 cm à 150 kPa et 1,50 cm à 200 kPa. Il continue ensuite à augmenter jusqu'à environ 2,10 cm à 250 kPa et 2,80 cm à 300 kPa. En présence d'un renforcement, les valeurs restent plus faibles sur toute la plage de chargement, avec environ 0,14 cm à 50 kPa, 0,35 cm à 100 kPa, 0,60 cm à 150 kPa, 0,90 cm à 200 kPa, 1,28 cm à 250 kPa et 1,70 cm à 300 kPa. L'écart entre les deux courbes représente le tassement évité grâce au traitement du sol ; il devient de plus en plus important lorsque la pression augmente, ce qui montre que l'effet bénéfique du renforcement est particulièrement marqué pour les niveaux de sollicitation élevés. La courbe de réduction

relative confirme cette tendance. La diminution du tassement est voisine de 44 % à 50 kPa, puis d'environ 40 % à 100 kPa, 40 % à 150 kPa et 40 % à 200 kPa. Elle reste encore proche de 39 % à 250 kPa et atteint environ 39 % à 300 kPa. Ces résultats montrent que le renforcement permet non seulement de réduire les tassements absolus, mais aussi de maintenir une efficacité relativement stable sur l'ensemble de la plage de pression étudiée. À la charge maximale représentée, la réduction du tassement est de 1,10 cm, puisque le tassement passe de 2,80 cm pour le sol non renforcé à 1,70 cm pour le sol renforcé. D'un point de vue géotechnique, cette amélioration traduit une augmentation de la rigidité globale du massif de sol et une meilleure diffusion des contraintes sous la fondation. Dans le cadre des bâtiments économiques, cette diminution des tassements constitue un résultat particulièrement important, car elle contribue à limiter les risques de fissuration, de déformation des éléments porteurs et de tassements différentiels, tout en orientant le choix vers des solutions de fondation à la fois techniquement sûres et économiquement optimisées.

## 5- Synthèse des paramètres géotechniques et des performances du renforcement pour l'optimisation des fondations par réseaux de neurones artificiels

La figure 5 ci-après rassemble les principaux résultats géotechniques mobilisés dans l'étude afin de relier le choix du type de fondation, la position du renforcement, la géométrie de la semelle et la réponse en tassement du système sol-fondation. Les quatre sous-figures permettent ainsi de synthétiser les variables déterminantes susceptibles d'être utilisées comme données d'entrée, critères de contrôle ou objectifs d'optimisation dans le modèle fondé sur les réseaux de neurones artificiels appliqué aux bâtiments économiques.

**Synthèse géotechnique pour la modélisation et l'optimisation par réseaux de neurones artificiels**

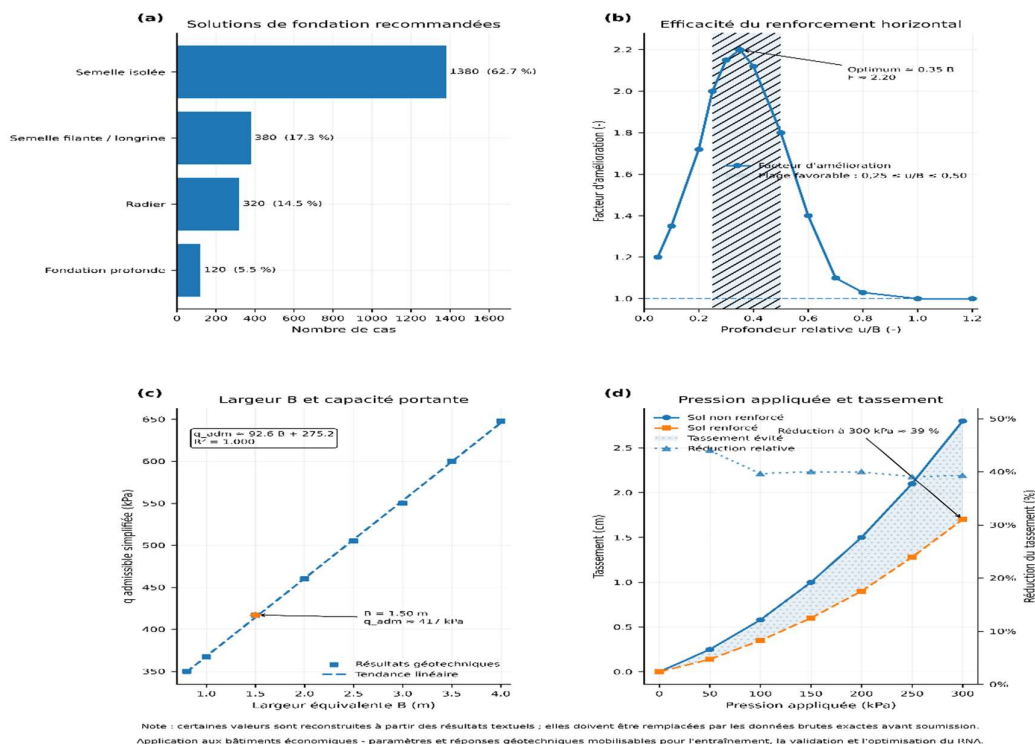


Figure 5: Synthèse des paramètres géotechniques et des performances du renforcement pour l'optimisation des fondations par réseaux de neurones artificiels

Source : Auteur

## Interprétation

La sous-figure (a) montre que les semelles isolées constituent la solution la plus fréquemment recommandée, avec 1 380 cas sur 2 200, soit 62,7 % des configurations étudiées. Elles sont suivies des semelles filantes ou associées à des longrines avec 380 cas, soit 17,3 %, puis des radiers avec 320 cas, correspondant à 14,5 %. Les fondations profondes restent minoritaires avec seulement 120 cas, soit 5,5 %. Cette distribution indique que les fondations superficielles répondent aux exigences géotechniques dans la majorité des configurations et apparaissent donc particulièrement adaptées à une démarche visant la réduction des coûts de construction. La sous-figure (b) met toutefois en évidence que l'efficacité du renforcement dépend fortement de sa profondeur relative. Le facteur d'amélioration passe d'environ 1,20 pour  $u/B=0,05$  à un maximum voisin de 2,20 autour de  $u/B=0,35$ . La plage comprise entre  $0,25 \leq u/B \leq 0,50$  apparaît comme la zone la plus favorable, tandis qu'au-delà de  $u/B=0,60$ , l'efficacité diminue rapidement pour devenir pratiquement nulle, avec un facteur proche de 1,00 vers  $u/B=1,00$  à 1,20. Ce résultat confirme que la profondeur du renforcement constitue une variable d'optimisation importante et ne doit pas être augmentée systématiquement. La sous-figure (c) montre parallèlement une augmentation quasi linéaire de la capacité portante admissible avec la largeur équivalente de la fondation. La capacité passe d'environ 350 kPa pour  $B=0,8$  m à près de 648 kPa pour  $B=4,0$  m. La relation obtenue,  $q_{adm} \approx 92,6B + 275,2$ , présente un coefficient de détermination  $R^2=1,000$  dans la plage considérée. Pour une semelle de  $B=1,50$  m, la capacité admissible est estimée à environ 417 kPa. Cette tendance montre que l'augmentation de la largeur favorise la mobilisation d'un volume de sol plus important et améliore la capacité portante, mais elle implique également une consommation accrue de matériaux et de terrassement. L'intérêt de l'optimisation consiste donc à rechercher la largeur minimale capable de satisfaire simultanément les exigences de sécurité et de service. Enfin, la sous-figure (d) confirme l'efficacité du traitement du sol sur les déformations. À 100 kPa, le tassement diminue d'environ 0,58 cm pour le sol non renforcé à 0,35 cm pour le sol renforcé. À 200 kPa, il passe de 1,50 cm à 0,90 cm, tandis qu'à 300 kPa il est réduit de 2,80 cm à 1,70 cm. La réduction atteint ainsi environ 39 % à la pression maximale considérée et demeure proche de 40 % sur une grande partie de la plage de chargement. L'ensemble de ces résultats montre que la performance du système ne dépend pas d'un paramètre unique, mais de l'interaction entre le type de fondation, sa largeur, la profondeur du renforcement et le niveau de pression appliquée. Cette interdépendance justifie le recours aux réseaux de neurones artificiels, capables de modéliser simultanément ces relations et d'identifier des configurations permettant de concilier capacité portante, maîtrise des tassements et économie de construction.

## 4. DISCUSSION

Les résultats obtenus mettent en évidence l'intérêt d'une approche intégrée associant caractéristiques géotechniques, géométrie des fondations et paramètres de renforcement. La forte proportion de semelles isolées, qui représente 62,7 % des 2 200 configurations étudiées, montre que les fondations superficielles peuvent constituer une solution privilégiée lorsque les conditions de portance et de tassement restent compatibles avec les exigences du projet. Les semelles filantes ou longrines, les radiers et les fondations profondes interviennent progressivement lorsque les contraintes géotechniques ou structurales deviennent plus importantes. Cette répartition confirme l'intérêt d'un outil de décision capable d'adapter automatiquement le type de fondation aux caractéristiques du sol et aux sollicitations appliquées. L'analyse du renforcement montre toutefois que son efficacité dépend fortement de son positionnement. Le facteur d'amélioration atteint une valeur maximale proche de 2,20 pour une profondeur relative ( $u/B$ ) voisine de 0,35, tandis que la plage comprise entre 0,25 et 0,50  $B$  apparaît globalement favorable. Au-delà de cette zone, l'efficacité diminue progressivement jusqu'à devenir presque nulle pour les grandes profondeurs relatives. Ce comportement montre qu'un renforcement plus profond n'est pas nécessairement plus performant et qu'une optimisation de sa position peut permettre de limiter les quantités de matériaux et les travaux associés. L'influence de la largeur de la fondation est également significative. La capacité portante admissible augmente d'environ 350 kPa pour une largeur de 0,8 m à près de 648 kPa pour une largeur de 4,0 m. Cette amélioration doit néanmoins être mise en balance avec l'augmentation du volume de béton, des armatures et des terrassements. Le dimensionnement optimal ne consiste donc pas à rechercher systématiquement la plus grande largeur, mais à déterminer une dimension permettant de satisfaire les critères de sécurité tout en évitant le surdimensionnement. Enfin, la comparaison des courbes pression-tassement confirme l'effet favorable du renforcement sur la déformabilité du sol. Sous une pression de 300 kPa, le tassement diminue de 2,80 cm à 1,70 cm, soit une réduction d'environ 39 %. L'ensemble de ces résultats met en évidence des interactions entre plusieurs paramètres qui justifient l'utilisation des réseaux de neurones artificiels

comme outil complémentaire de modélisation et d'optimisation. Leur intérêt réside notamment dans leur capacité à intégrer simultanément plusieurs variables afin d'orienter le choix vers une configuration conciliant capacité portante suffisante, limitation des tassements, efficacité du renforcement et maîtrise des coûts de fondation.

## 5. CONCLUSION

Cette étude a permis de mettre en évidence l'intérêt d'une approche combinant modélisation géotechnique, renforcement des sols et réseaux de neurones artificiels pour l'optimisation des fondations. L'analyse de 2 200 configurations montre une prédominance des semelles isolées, représentant 62,7 % des solutions recommandées, devant les semelles filantes ou longrines, les radiers et les fondations profondes. Cette distribution confirme que les fondations superficielles peuvent répondre à une grande partie des situations étudiées lorsqu'elles sont correctement adaptées aux caractéristiques du terrain. Les résultats montrent également que l'efficacité du renforcement dépend fortement de sa profondeur relative. Une plage favorable comprise entre 0,25 et 0,50 B a été identifiée, avec un optimum autour de  $(u/B = 0,35)$  et un facteur d'amélioration proche de 2,20. Parallèlement, l'augmentation de la largeur de la fondation améliore la capacité portante admissible, qui passe d'environ 350 kPa pour  $(B = 0,8)$  m à près de 648 kPa pour  $(B = 4,0)$  m. Le renforcement permet en outre de réduire sensiblement les tassements, avec une diminution d'environ 39 % sous une pression de 300 kPa, le tassement passant de 2,80 cm à 1,70 cm. Ces résultats confirment que l'optimisation des fondations ne peut reposer sur un seul paramètre, mais doit considérer simultanément le type de fondation, sa géométrie, le niveau de chargement et la position du renforcement. L'utilisation des réseaux de neurones artificiels constitue ainsi une approche pertinente pour intégrer ces interactions et orienter le choix vers des solutions assurant un compromis entre capacité portante, maîtrise des tassements, efficacité du renforcement et réduction des coûts. Cette démarche ouvre également la voie à des outils d'aide à la décision plus rapides et adaptables pour le dimensionnement des fondations de bâtiments économiques.

## Référence

- [1] K. Terzaghi, R. B. Peck and G. Mesri, *Soil Mechanics in Engineering Practice*, 3rd ed., New York: John Wiley & Sons, 1996.
- [2] J. E. Bowles, *Foundation Analysis and Design*, 5th ed., New York: McGraw-Hill, 1996.
- [3] B. M. Das, *Principles of Foundation Engineering*, 8th ed., SI Edition, Cengage Learning, 2016.
- [4] J. Han, *Principles and Practice of Ground Improvement*, 1st ed., John Wiley & Sons, 2015.
- [5] M. A. Shahin, M. B. Jaksa and H. R. Maier, "Artificial neural network applications in geotechnical engineering," *Australian Geomechanics Journal*, vol. 36, no. 1, pp. 49–62, 2001.
- [6] M. A. Shahin, H. R. Maier and M. B. Jaksa, "Predicting settlement of shallow foundations using neural networks," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 128, no. 9, pp. 785–793, 2002, doi: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2002)128:9(785).
- [7] M. A. Shahin, "Recent advances and future challenges for artificial neural systems in geotechnical engineering applications," *Advances in Artificial Neural Systems*, vol. 2009, Article ID 308239, 2009, doi: 10.1155/2009/308239.
- [8] C. R. Harris, K. J. Millman, S. J. van der Walt et al., "Array programming with NumPy," *Nature*, vol. 585, pp. 357–362, 2020, doi: 10.1038/s41586-020-2649-2.
- [9] W. McKinney, "Data Structures for Statistical Computing in Python," in *Proceedings of the 9th Python in Science Conference*, pp. 56–61, 2010.
- [10] F. Pedregosa, G. Varoquaux, A. Gramfort et al., "Scikit-learn: Machine Learning in Python," *Journal of Machine Learning Research*, vol. 12, pp. 2825–2830, 2011.
- [11] M. Abadi, P. Barham, J. Chen et al., "TensorFlow: A System for Large-Scale Machine Learning," in *12th USENIX Symposium on Operating Systems Design and Implementation*, 2016.
- [12] F. Chollet et al., Keras, GitHub repository, 2015. La documentation du projet indique cette référence pour citer Keras.

- [13] X. Glorot and Y. Bengio, "Understanding the Difficulty of Training Deep Feedforward Neural Networks," in Proceedings of the Thirteenth International Conference on Artificial Intelligence and Statistics, pp. 249–256, 2010.
- [14] D. P. Kingma and J. Ba, "Adam: A Method for Stochastic Optimization," in International Conference on Learning Representations, 2015.
- [15] L. N. Smith, "A Disciplined Approach to Neural Network Hyper-Parameters: Part 1—Learning Rate, Batch Size, Momentum, and Weight Decay," arXiv:1803.09820, 2018.