

Optimisation hybride de réseaux de neurones convolutionnels via NAS et métaheuristiques inspirées des comportements naturels

Bechir Ousmane Tom¹

¹Encadrant : Adán José-García ^{1,2}

¹Univ. Lille, Faculté de science et technologie

²Univ. Lille, Inserm, CHU Lille, U1286 INFINITE, F-59000 Lille, France

Resumé : Dans ce travail, nous avons exploré une approche hybride pour l’optimisation des architectures de réseaux de neurones convolutionnels (CNN), combinant la recherche d’architecture neuronale (NAS) avec des algorithmes métaheuristiques inspirés des comportements naturels, en particulier l’algorithme génétique et l’algorithme Firefly. Après avoir défini un espace de recherche structuré pour les hyperparamètres architecturaux des CNNs, nous avons détaillé les mécanismes d’encodage, de sélection, de croisement et de mutation propres à chaque méthode. Les expériences menées sur les jeux de données MNIST et CIFAR-10 montrent que les approches métaheuristiques surpassent significativement la recherche aléatoire, tant en termes de précision que de capacité de généralisation. L’algorithme génétique, en particulier, se distingue par sa robustesse et son efficacité, démontrant l’intérêt des stratégies hybrides pour l’optimisation automatique des architectures de réseaux de neurones profonds. Notre implémentation complète de ces algorithmes est disponible sur GitHub au lien :

<https://github.com/bechirousmane/Optimization-of-CNN-using-NAS-and-Metaheuristics>

Mots clés: NAS, CNN, optimisation, hyperparamètres, intelligence en essaim, algorithmes évolutionnaires, métaheuristiques

1 Introduction

Les réseaux de neurones convolutionnels (CNN [1]) ont démontré une efficacité remarquable dans des nombreuses tâches de vision par ordinateur, telles que la classification d’images, la détection des objets ou la segmentation sémantique. Cependant, les performances de ces modèles dépendent fortement de choix de leur configuration interne, notamment des hyperparamètres qui régissent leur structure et leur fonctionnement.

Des méthodes classiques d’optimisation, telles que la recherche par grille (grid search) ou la recherche aléatoire (random search) [2] ainsi que des approches probabilistes plus avancées comme l’optimisation bayésienne [3] sont souvent employées pour régler ces hyperparamètres. Cependant, elles ont une efficacité très limitée face à la complexité de l’espace de recherche, surtout dans le cadre de problèmes **NP-difficiles** [4].

D’autres approches plus robustes et adaptées aux problèmes **NP-difficiles** [4], telles que les algorithmes évolutionnaires et les algorithmes basés sur l’intelligence en essaim ont été explorés. Parmi elles, on retrouve les algorithmes génétiques (GA) [5] l’algorithme de croissance d’arbres (Tree Growth Algorithm, TGA) [6], l’optimisation par essaim de particules (Particle Swarm Optimization, PSO) [7] ou l’algorithme des lucioles (Firefly Algorithm, FA) [8]. Ces approches ont montré des performances remarquables dans l’optimisation des hyperparamètres. Dans la littérature, le terme ”hyperparamètre” désigne généralement des paramètres réglés manuellement avant l’entraînement, tels que le taux

d'apprentissage, la taille du batch ou le nombre d'époques. Toutefois, un ensemble tout aussi crucial de paramètres concerne directement l'architecture du modèle : le nombre de couches, le nombre de filtres par couche, la taille des noyaux de convolution, ou encore le nombre de neurones dans les couches entièrement connectées. Ces éléments, bien qu'ils déterminent la topologie du réseau, sont aussi considérés comme des hyperparamètres dans un sens plus large, car ils influencent fortement la capacité d'apprentissage du modèle tout en étant fixés avant l'entraînement. C'est dans ce contexte que les approches de Neural Architecture Search (NAS) [9] ont émergé. Ces méthodes visent à automatiser l'exploration de l'espace des architectures possibles pour trouver une configuration optimale. Ces dernières années, NAS [9] s'est imposé comme une stratégie prometteuse pour trouver des architectures optimales, notamment dans la classification d'images (Liu et al [10], Tan et al [11]). Dans ce travail, nous explorons une approche hybride de NAS combinée à des algorithmes métaheuristiques, en particulier l'algorithme génétique et l'algorithme Firefly, afin d'optimiser les hyperparamètres structuraux des CNNs.

2 Revue de la littérature

La recherche par grille est une méthode classique et l'une des plus anciennes employée pour l'optimisation des hyperparamètres. Elle est efficace lorsque l'espace de recherche est relativement petit et devient très gourmande quand l'espace devient grand. Une autre méthode combinatoire qui est la recherche aléatoire [2], est souvent utilisée. James et Bengio(2012) [12] ont montré empiriquement et théoriquement que la recherche aléatoire est plus efficace que la recherche par grille, notamment quand l'espace de recherche est relativement petit. L'optimisation bayésienne [3] est une méthode probabiliste sophistiquée basé sur le théorème de Bayes. Les travaux de Wu et al [13]. ont montré que l'optimisation bayésienne basé sur le processus gaussien permet d'atteindre une grande précision(88,41% après 50 itérations) sur le jeu de données CIFAR-10 [14]. Les algorithmes métaheuristiques tels que les algorithmes évolutionnaires ou les algorithmes basés sur l'intelligence en essaims sont plus robustes et mieux adaptés aux problèmes NP-difficiles [4]. Ces approches ont démontré leur efficacité dans l'optimisation des hyperparamètres des réseaux de neurones convolutionnels grâce à leur capacité à explorer efficacement des espaces de recherche complexes et non-convexes. Les algorithmes génétiques (GA) [5] constituent l'une des approches les plus établies dans le domaine de l'optimisation évolutionnaire. Xie et Yuille (2017) [5] ont proposé Genetic CNN, une approche qui utilise les principes évolutionnaires pour optimiser automatiquement les architectures de CNN. Leur méthode encode les architectures sous forme de chromosomes et applique des opérateurs de sélection, croisement et mutation pour explorer l'espace des architectures possibles. Cette approche a montré des résultats prometteurs sur les jeux de données CIFAR-10 et CIFAR-100. L'optimisation par essaim de particules (Particle Swarm Optimization, PSO) [7] s'inspire du comportement social des essaims d'oiseaux ou de poissons. Kennedy et Eberhart (1995) [7] ont introduit cette méthode qui a depuis été largement appliquée à l'optimisation des hyperparamètres des réseaux de neurones. PSO présente l'avantage de converger rapidement vers des solutions de qualité tout en maintenant une diversité dans la population de solutions. L'algorithme des lucioles (Firefly Algorithm, FA) [8] proposé par Yang (2009) s'inspire du comportement de clignotement des lucioles pour s'attirer mutuellement. Cet algorithme présente des caractéristiques intéressantes pour l'optimisation des CNN : il combine une exploration globale efficace avec une exploitation locale intensive. La nature décentralisée de FA permet une parallélisation naturelle, ce qui est particulièrement avantageux pour l'optimisation coûteuse des architectures de réseaux de neurones. Zoph et Le (2016) [9] ont introduit le concept de NAS en utilisant l'apprentissage par renforcement pour explorer l'espace des architectures. Leur approche utilise un réseau de neurones récurrent comme contrôleur pour générer des descriptions d'architectures, qui sont ensuite évaluées sur un jeu de données cible. Liu et al [10]. (2018) ont proposé Progressive NAS (PNAS), qui réduit significativement le coût computationnel en utilisant une stratégie de recherche progressive. Tan et Le (2019) [11] ont développé EfficientNet, qui démontre l'importance du dimensionnement uniforme des réseaux (profondeur, largeur et résolution) et a établi de nouveaux standards de performance sur ImageNet. Ces travaux illustrent le potentiel de NAS pour découvrir des architec-

tures qui surpassent les conceptions manuelles expertes. Les approches hybrides combinant NAS avec des algorithmes méta-heuristiques représentent une solution de recherche prometteuse. Ces méthodes tirent parti des avantages de chaque approche : la capacité de NAS à définir des espaces de recherche structurés et l'efficacité des méta-heuristiques à explorer des espaces complexes. Des études récentes ont montré que l'utilisation d'algorithmes évolutionnaires dans le contexte de NAS peut améliorer significativement les performances tout en réduisant les coûts computationnels. EvoNAS-Rep [15] a obtenu 96,35% et 79,82% de précision sur CIFAR-10 et CIFAR-100 avec seulement 0,2 GPU-jours, démontrant à la fois efficacité et performance. L'intégration de techniques d'intelligence en essaims avec NAS permet également une exploration plus diversifiée de l'espace des architectures, évitant ainsi les optima locaux qui peuvent limiter les approches traditionnelles. DeepSwarm [16] propose une méthode NAS basée sur l'optimisation par colonie de fourmis (ACO) qui combine la recherche progressive d'architecture neuronale avec la réutilisabilité des poids pour plus d'efficacité.

3 Définition de l'espace de recherche

La configuration de l'espace de recherche est une étape cruciale incluant le choix des hyperparamètres à optimiser et les intervalles pour chaque hyperparamètre. Pour des raisons d'insuffisance de ressource, nous avons fait le choix d'optimiser un ensemble restreint mais représentatif d'hyperparamètres architecturaux des CNNs.

Nos choix reposent sur la définition d'intervalles discrets pour les principaux hyperparamètres structuraux des réseaux convolutifs. Ces hyperparamètres ont été sélectionnés de manière à offrir une variabilité suffisante tout en maintenant un cadre d'exploration maîtrisable.

Pour les couches convolutionnelles, quatre valeurs discrètes ont été retenues pour chacun des paramètres suivants : le nombre de filtres, la taille du noyau et le stride. Le padding a quant à lui été fixé à 1 afin de conserver les dimensions spatiales d'entrée. Ces choix permettent de contrôler à la fois la capacité de représentation des couches, la granularité des caractéristiques extraites et le taux de réduction spatiale. Les couches de pooling suivent une configuration similaire. La taille du noyau et le stride sont également choisis parmi quatre valeurs discrètes, tandis que le padding est fixé à 1. Le type de pooling utilisé est exclusivement MaxPool2d, ce qui garantit une invariance spatiale efficace tout en limitant la complexité de l'espace de recherche. S'agissant des couches entièrement connectées, la taille de chaque couche est choisie parmi un ensemble de seize valeurs discrètes, couvrant un spectre suffisamment large pour s'adapter à différentes profondeurs et configurations. Par ailleurs, la fonction d'activation utilisée dans ces couches est sélectionnée parmi quatre options distinctes, introduisant une variabilité supplémentaire au niveau de la non-linéarité du modèle. Enfin, le nombre total de couches dans les architectures générées est contraint à appartenir à l'intervalle $[2, 10]$, ce qui permet de contrôler la profondeur du réseau tout en assurant une diversité architecturale.

En combinant les différentes valeurs possibles des hyperparamètres et en tenant compte des contraintes structurelles (position des couches, absence de pooling consécutif, etc.), l'espace de recherche atteint une complexité combinatoire très élevée. Pour chaque architecture de longueur $L \in [2, 10]$, et pour chaque possible nombre de couches entièrement connectées $k \in [1, L - 1]$, le nombre de séquences valides de $n = L - k$ couches convolutionnelles et de pooling est noté $F(n)$. Chaque séquence valide est ensuite associée à un nombre de configurations d'hyperparamètres donné par :

$$(4 \times 4 \times 4)^{\text{nb Conv}} \times (4 \times 4)^{\text{nb Pool}} \times (16 \times 4)^k = 64^{\text{nb Conv}} \times 16^{\text{nb Pool}} \times 64^k$$

Ainsi, le nombre total d'architectures N peut être exprimé comme suit :

$$N = \sum_{L=2}^{10} \sum_{k=1}^{L-1} \left[\sum_{\text{séquences valides de longueur } n=L-k} (64^{\text{nb Conv}} \times 16^{\text{nb Pool}} \times 64^k) \right]$$

Cette estimation démontre que le nombre total d'architectures possibles est astronomique, rendant toute exploration exhaustive irréaliste. Ce constat justifie le recours à des méthodes d'optimisation métaheuristiques, telles que les algorithmes évolutionnaires, pour naviguer efficacement dans cet espace

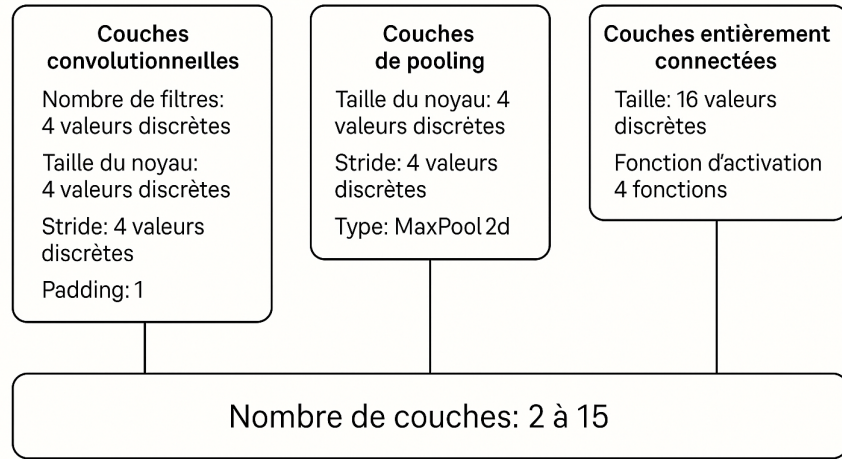


Figure 1: Espace de recherche

complexe.

4 Algorithme génétique

L'algorithme génétique [5] est une méthode bio-inspirée ressemblant à la sélection naturelle. Cette approche évolutionnaire permet d'explorer efficacement l'espace de recherche des architectures de réseaux de neurones en appliquant les principes de sélection, croisement et mutation, sur une population d'individus représentant différentes architectures. L'avantage principal de cette méthode réside dans sa capacité à échapper aux optima locaux grâce à la diversité maintenue dans la population et aux opérateurs stochastiques qui permettent d'explorer des régions prometteuses de l'espace de recherche.

4.1 Représentation de l'espace de recherche

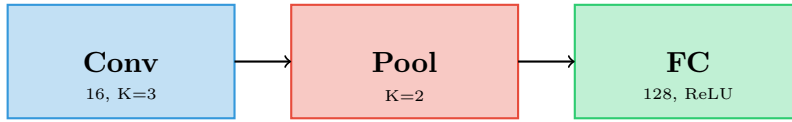
La représentation des architectures constitue un élément fondamental dans l'efficacité d'un algorithme génétique. Dans notre approche, chaque architecture de réseau de neurones convolutionnel est encodée sous forme de chaîne binaire, permettant une manipulation directe et efficace lors des opérations génétiques.

4.1.1 Encodage binaire des architectures

Chaque couche du réseau est représentée par un chromosome de longueur fixe de 8 bits, structuré de manière hiérarchique. Les deux premiers bits définissent le type de couche selon le codage suivant :

- 00 : absence de couche (position vide dans l'architecture)
- 01 : couche convolutionnelle
- 10 : couche de sous-échantillonnage (pooling)
- 11 : couche entièrement connectée

Les six bits restants encodent les paramètres spécifiques à chaque type de couche. Pour les couches convolutionnelles, ces paramètres comprennent le nombre de filtres, la taille du noyau de convolution et le pas de convolution. Les couches de pooling sont caractérisées par la taille de leur fenêtre et leur pas, tandis que les couches entièrement connectées sont définies par leur nombre de neurones et leur fonction d'activation. La Figure 2 montre un exemple d'une architecture de CNN simple avec une couche de convolution, une couche de pooling et une couche entièrement connectée.



Encodage Binaire :

0	1	1	0	0	0	0	0	Conv: 01100000
1	0	0	1	0	1	0	0	Pool: 10010100
1	1	1	1	1	1	0	0	FC: 11111100

Chromosome : 011000001001010011111100

Figure 2: Exemple d'encodage binaire d'une architecture CNN

4.1.2 Avantages de cette représentation

Cette représentation binaire présente plusieurs avantages significatifs. Premièrement, elle assure une longueur constante pour chaque couche, facilitant les opérations de croisement et de mutation. Deuxièmement, la séparation claire entre le type de couche et ses paramètres permet de préserver la cohérence structurelle lors des modifications. Enfin, l'utilisation d'index pour référencer les valeurs possibles des paramètres garantit que seules des configurations valides peuvent être générées. Une architecture complète est donc représentée par la concaténation des encodages binaires de toutes ses couches, créant ainsi un génotype de longueur variable qui peut être manipulé efficacement par les opérateurs génétiques.

4.2 Stratégies de sélection

Dans les algorithmes évolutionnaires, la stratégie de sélection joue un rôle clé dans la pression de sélection exercée sur la population. Pour cette étude, nous avons adopté une stratégie élitiste qui consiste à choisir un nombre les n meilleurs individus dans la population pour représenter la génération suivante. Néanmoins, il existe d'autre stratégie de sélection telles que la sélection par rang polynomiale [17] qui consiste à attribuer à chaque individu une probabilité de sélection qui dépend uniquement de son rang dans la population (après tri selon la performance). Dans le cas général, on peut utiliser une fonction polynômiale de degré d :

$$P(I = k) = \sum_{l=1}^{d+1} a_l k^{l-1}$$

où k est le rang de l'individu, et les coefficients a_l sont choisis de façon à garantir que $P(I = k)$ soit toujours positive et que la somme des probabilités égale 1 sur l'ensemble de la population. Cette approche permet de moduler la pression de sélection en fonction du choix des coefficients. Une autre stratégie de qui est la sélection par tournoi probabiliste [17] où on sélectionne aléatoirement t individus dans la population (avec ou sans remise), puis on les classe selon leur performance. La sélection probabiliste consiste alors à choisir le s -ème meilleur individu du tournoi avec une probabilité α_s donnée. La probabilité pour qu'un individu de rang k soit finalement sélectionné s'écrit alors :

$$P(I = k) = \sum_{s=1}^t \alpha_s P(I_s = k)$$

où $P(I_s = k)$ est la probabilité pour que l'individu de rang k occupe la s -ème place dans le classement du tournoi. Nous avons aussi implémenter ces deux stratégies dans notre code disponible sur github.

4.3 Croisement

Le croisement constitue l'opérateur principal de recombinaison génétique, permettant de combiner les caractéristiques de deux architectures parentes pour générer de nouvelles solutions potentiellement meilleures. Dans le contexte de l'évolution d'architectures de réseaux de neurones, le croisement doit préserver la cohérence structurelle tout en permettant l'émergence de nouvelles configurations.

4.3.1 Croisement à un point adapté

Nous avons opté pour un croisement à un point modifié, spécifiquement adapté à notre représentation binaire des architectures. Contrairement au croisement classique qui peut couper la chaîne binaire à n'importe quelle position, notre approche limite les points de coupure aux frontières entre chromosomes de couches. Le processus se déroule comme suit : deux points de coupure sont sélectionnés aléatoirement, chacun aligné sur le début d'un chromosome de couche dans les architectures parentes respectives. Les segments suivant ces points sont alors échangés entre les parents, générant deux architectures enfants. Cette contrainte d'alignement garantit que les couches individuelles restent intactes lors du croisement. La Figure 3 illustre ce processus de croisement adapté. Chaque architecture parente est représentée par une séquence de chromosomes de 8 bits, où chaque chromosome encode une couche spécifique. Les points de coupure (indiqués par les flèches) sont positionnés au début des chromosomes, préservant ainsi l'intégrité de chaque couche lors de l'échange des segments.

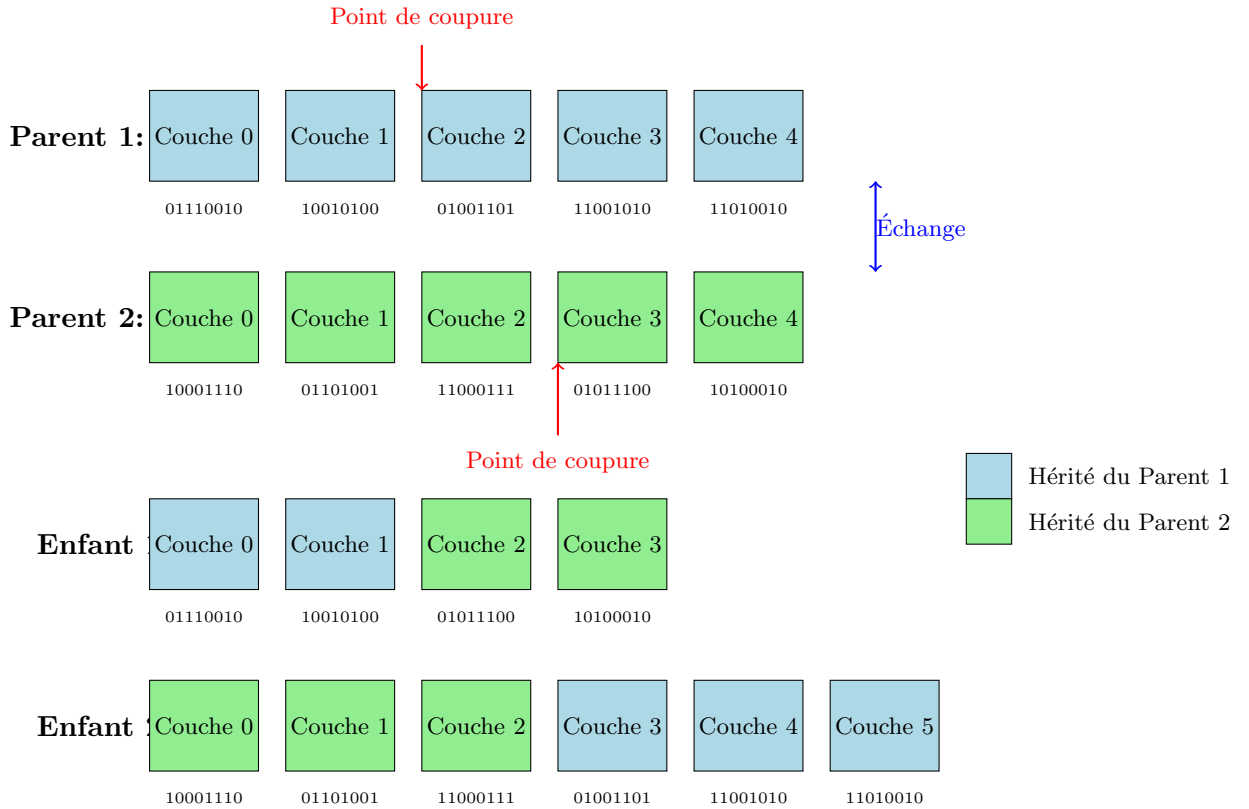


Figure 3: Illustration du croisement à un point adapté. Les points de coupure sont alignés sur les frontières des chromosomes de couches, préservant l'intégrité de chaque couche lors de l'échange des segments entre parents.

4.3.2 Préservation de la cohérence structurelle

L'avantage principal de cette approche réside dans la préservation de la cohérence des couches individuelles. En évitant de couper au milieu d'un chromosome de couche, nous nous assurons que chaque couche de l'architecture résultante conserve des paramètres cohérents. Ceci est crucial car une

couche avec des paramètres incohérents pourrait conduire à une architecture invalide ou à des performances dégradées. De plus, cette méthode permet un héritage logique des caractéristiques des parents : une architecture enfant peut hériter des premières couches d'un parent et des couches finales de l'autre, créant potentiellement des combinaisons synergiques entre différentes stratégies d'extraction de caractéristiques.

4.4 Mutation

La mutation joue un rôle essentiel dans le maintien de la diversité génétique de la population et dans l'exploration de nouvelles régions de l'espace de recherche. Elle permet d'introduire des variations qui ne pourraient pas être obtenues par le seul mécanisme de croisement, évitant ainsi la convergence prématurée vers des optima locaux.

4.4.1 Stratégie de mutation adaptative

Notre stratégie de mutation adopte une approche adaptative qui ajuste l'intensité de la mutation selon la taille de l'architecture. Pour chaque individu à muter, le nombre de bits modifiés est limité à une fraction de la longueur totale de l'architecture, typiquement un tiers. Cette limitation évite des modifications trop drastiques qui pourraient détruire des caractéristiques prometteuses. La sélection des bits à muter se fait de manière aléatoire, mais avec une contrainte importante : les bits définissant le type de couche sont protégés contre la mutation. Cette protection préserve la structure générale de l'architecture tout en permettant la modification fine des paramètres de chaque couche.

4.4.2 Équilibre exploration-exploitation

Le taux de mutation constitue un paramètre critique qui influence l'équilibre entre exploration et exploitation. Un taux trop élevé peut transformer l'algorithme en recherche aléatoire, perdant l'avantage de l'accumulation progressive de bonnes caractéristiques. Inversement, un taux trop faible peut conduire à une stagnation de la population. Notre approche utilise un taux de mutation modéré, généralement fixé à 10%, appliqué de manière probabiliste à chaque bit sélectionné pour mutation. Cette stratégie permet d'introduire des variations subtiles dans les paramètres des couches tout en préservant la majorité des caractéristiques de l'architecture parentale. L'effet combiné de ces opérateurs génétiques - sélection, croisement et mutation - crée un processus d'évolution dirigée qui explore efficacement l'espace des architectures possibles tout en maintenant et améliorant les meilleures solutions découvertes. Cette approche évolutionnaire s'avère particulièrement adaptée à la recherche d'architectures de réseaux de neurones, où l'espace de recherche est vaste et les interactions entre composants sont complexes.

Algorithm 1 Algorithme génétique pour la recherche d'architectures CNN

Require: N : taille de la population, G : nombre de générations, p_c : probabilité de croisement, p_m : taux de mutation

Ensure: Meilleure architecture trouvée

```
1: Initialisation
2:  $P_0 \leftarrow$  Générer population initiale de  $N$  architectures aléatoirement
3:  $\text{fitness}(P_0) \leftarrow$  Évaluer toutes les architectures de  $P_0$  en parallèle
4:  $\text{meilleure\_fitness} \leftarrow 0$ 
5:  $\text{meilleure\_architecture} \leftarrow \emptyset$ 
6: for  $g = 1$  to  $G$  do
7:   // Phase de sélection et reproduction
8:    $\text{nouvelle\_génération} \leftarrow \emptyset$ 
9:   // Élitisme : conserver les meilleurs individus
10:   $\text{élite\_count} \leftarrow \max(1, N/10)$ 
11:  Trier  $P_{g-1}$  par fitness décroissante
12:   $\text{élite} \leftarrow$  Sélectionner les  $\text{élite\_count}$  meilleurs
13:   $\text{nouvelle\_génération} \leftarrow \text{nouvelle\_génération} \cup \text{élite}$ 
14:  while  $|\text{nouvelle\_génération}| < N$  do
15:    // Sélection des parents
16:     $\text{parents} \leftarrow$  Sélectionner 2 individus selon la stratégie choisie
17:    // Croisement
18:    if  $\text{random}() < p_c$  then
19:       $\text{enfant\_binaire} \leftarrow \text{CroisementUnPoint}(\text{parents}[0], \text{parents}[1])$ 
20:       $\text{enfant} \leftarrow \text{BinairesVersArchitecture}(\text{enfant\_binaire})$ 
21:    else
22:       $\text{enfant} \leftarrow \text{parents}[0]$ 
23:    end if
24:    // Mutation
25:     $\text{enfant\_binaire} \leftarrow \text{ArchitectureVersBinaire}(\text{enfant})$ 
26:     $\text{enfant\_muté\_binaire} \leftarrow \text{Muter}(\text{enfant\_binaire}, p_m)$ 
27:     $\text{enfant\_muté} \leftarrow \text{BinairesVersArchitecture}(\text{enfant\_muté\_binaire})$ 
28:     $\text{nouvelle\_génération} \leftarrow \text{nouvelle\_génération} \cup \{\text{enfant\_muté}\}$ 
29:  end while
30:  // Évaluation de la nouvelle génération
31:  Ajuster la taille à  $N$  si nécessaire
32:   $P_g \leftarrow \text{nouvelle\_génération}$ 
33:   $\text{fitness}(P_g) \leftarrow$  Évaluer toutes les architectures de  $P_g$  en parallèle
34:  // Mise à jour du meilleur individu
35:  for chaque architecture  $a$  dans  $P_g$  do
36:    if  $\text{fitness}(a) > \text{meilleure\_fitness}$  then
37:       $\text{meilleure\_fitness} \leftarrow \text{fitness}(a)$ 
38:       $\text{meilleure\_architecture} \leftarrow a$ 
39:    end if
40:  end for
41: end for
42: return  $\text{meilleure\_architecture}, \text{meilleure\_fitness}$ 
```

Fonctions auxiliaires :

Algorithm 2 CroisementUnPoint(parent1, parent2)

```
1: parent1.bin ← ArchitectureVersBinaire(parent1)
2: parent2.bin ← ArchitectureVersBinaire(parent2)
3: Sélectionner points de coupure alignés sur les frontières des chromosomes
4: enfant1 ← Échanger segments après les points de coupure
5: enfant2 ← Échanger segments après les points de coupure
6: return Enfant valide parmi {enfant1, enfant2}
```

Algorithm 3 Muter(architecture_binaire, taux_mutation)

```
1: n_bits ← min(longueur/3, random(0, longueur))
2: Sélectionner n_bits positions aléatoirement (éviter les bits de type)
3: for chaque position sélectionnée i do
4:   if random() < taux_mutation then
5:     Inverser le bit à la position i
6:   end if
7: end for
8: return architecture_binaire modifiée
```

5 Algorithme Firefly

L'algorithme de lucioles (Firefly) [8] est une méta-heuristique inspirer du comportement de clignotement des lucioles pour s'attirer mutuellement. Il permet d'explorer l'espace de recherche des architectures de réseaux de neurones en appliquant les principes suivants :

5.1 Principe de base

L'algorithme simule le comportement des lucioles qui émettent de la lumière pour attirer leurs congénères. Dans ce contexte, chaque luciole représente une solution candidate (une architecture de réseau de neurones), et l'intensité lumineuse correspond à la qualité de cette solution selon une fonction objectif donnée.

5.2 Mécanisme d'attraction

Le mouvement des lucioles est régi par deux règles fondamentales :

1. Toutes les lucioles sont unisexes et s'attirent mutuellement
2. L'attractivité est proportionnelle à la brillance, qui diminue avec la distance

5.3 Représentation de l'espace de recherche

Pour appliquer l'algorithme Firefly à l'optimisation d'architectures de réseaux de neurones convolutifs (CNN), il est nécessaire de définir une représentation efficace de l'espace de recherche qui permette les opérations mathématiques requises par l'algorithme.

5.3.1 Encodage vectoriel des architectures

Chaque architecture de réseau de neurones est représentée sous forme de vecteur numérique de taille fixe. Cette approche permet de traiter les architectures comme des points dans un espace euclidien, facilitant ainsi le calcul des distances et les opérations de déplacement des lucioles.

Mapping des composants architecturaux

Les différents types de couches sont encodés par des valeurs entières discrètes. Cette discretisation permet de transformer l'espace de recherche architectural en un espace numérique manipulable :

$$\text{Type de couche} = \begin{cases} 0 & \text{absence de couche} \\ 1 & \text{couche convolutionnelle} \\ 2 & \text{couche de pooling} \\ 3 & \text{couche entièrement connectée} \end{cases} \quad (1)$$

De manière similaire, les paramètres de chaque type de couche sont mappés vers des indices entiers correspondant à des valeurs prédéfinies dans l'espace de recherche.

Structure de représentation vectorielle

L'architecture complète est encodée sous forme d'un vecteur de dimension fixe $\mathbf{n} = L \times p$, où L représente le nombre maximal de couches autorisées et p le nombre de paramètres par couche. Cette approche garantit une représentation uniforme permettant les opérations vectorielles nécessaires à l'algorithme.

Chaque sous-vecteur de dimension p encode une couche selon la structure suivante :

- Le premier élément encode le type de couche
- Les éléments suivants encodent les paramètres spécifiques selon le type

Pour les couches convolutionnelles, les paramètres incluent le nombre de filtres, la taille du noyau de convolution et le pas de convolution. Les couches de pooling sont caractérisées par la taille du noyau et le pas de pooling. Les couches entièrement connectées sont définies par leur taille et leur fonction d'activation.

5.3.2 Opérations dans l'espace vectoriel

Métrie de distance

La distance entre deux architectures est calculée dans l'espace euclidien par la norme L_2 :

$$\mathbf{r}_{i,j} = \|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j\|_2 = \sqrt{\sum_{k=1}^n (x_{i,k} - x_{j,k})^2} \quad (2)$$

Cette métrique permet de quantifier la similarité structurelle entre les architectures et guide le processus d'attraction dans l'algorithme Firefly.

Attractivités entre deux architecture

L'attractivité entre deux architectures distante de \mathbf{r} est calculé par :

$$\beta(\mathbf{r}) = \frac{\beta_0}{1 + \gamma r^2} \quad (3)$$

Où β_0 est l'attractivité de base (à distance zéro) et γ est un coefficient de l'absorption de la lumière

Déplacement des lucioles

Le mouvement d'une luciole i vers une luciole plus brillante j s'effectue selon l'équation de mise à jour :

$$\mathbf{x}_i^{t+1} = \mathbf{x}_i^t + \beta(\mathbf{r}_{ij})(\mathbf{x}_j^t - \mathbf{x}_i^t) + \alpha \epsilon^t \quad (4)$$

où ϵ^t est un vecteur aléatoire introduisant une composante stochastique nécessaire à l'exploration de l'espace de recherche et α est un paramètre de contrôle.

5.3.3 Équilibre exploitation-exploration

L'algorithme Firefly original présente des limitations importantes concernant l'équilibre entre exploitation et exploration de l'espace de recherche. Comme observé par Bacanin et al. [18], la version classique de l'algorithme souffre d'une convergence prématurée vers des optima locaux, particulièrement dans des espaces de recherche complexes tels que l'optimisation d'hyperparamètres de réseaux de neurones convolutionnels.

Problématique de la convergence prématurée

Dans sa formulation originale, l'algorithme Firefly manque d'un mécanisme efficace pour maintenir la diversité de la population au cours des itérations. Les lucioles ont tendance à converger rapidement vers les meilleures solutions trouvées, réduisant ainsi la capacité d'exploration de nouvelles régions prometteuses de l'espace de recherche. Cette limitation est particulièrement critique dans l'optimisation d'architectures neuronales, où l'espace de recherche présente de multiples optima locaux.

Mécanisme d'amélioration proposé

Pour remédier à cette limitation, nous proposons une extension de l'algorithme Firefly basée sur les travaux de Bacanin et al. [18]. L'amélioration consiste à introduire un mécanisme probabiliste qui alterne entre deux stratégies de déplacement :

1. **Déplacement classique** : Application de l'équation 4 de mouvement standard de l'algorithme Firefly
2. **Déplacement par distribution normale** : Utilisation d'une distribution normale multivariée pour générer des perturbations aléatoires

Formulation mathématique

Le mécanisme de déplacement hybride s'exprime comme suit :

$$\mathbf{x}_i^{t+1} = \begin{cases} \mathbf{x}_i^t + \beta(r_{i,j})(\mathbf{x}_j^t - \mathbf{x}_i^t) + \alpha\epsilon^t & \text{avec probabilité } (1 - p) \\ \mathbf{x}_i^t + \beta(r_{i,j})(\mathbf{x}_j^t - \mathbf{x}_i^t) + \mathcal{N}(\mathbf{0}, \sigma^2 \mathbf{I}) & \text{avec probabilité } p \end{cases} \quad (5)$$

où p est la probabilité d'utiliser la distribution normale, $\mathcal{N}(\mathbf{0}, \sigma^2 \mathbf{I})$ représente une distribution normale multivariée centrée avec une matrice de covariance diagonale, et σ contrôle l'amplitude des perturbations.

Adaptation dynamique des paramètres

Pour optimiser l'équilibre exploration-exploitation, les paramètres de l'algorithme sont adaptés dynamiquement au cours des itérations :

$$\alpha^{(t)} = \alpha_0 \times (0.97)^t \quad (6)$$

$$\sigma^{(t)} = \sigma_0 \times \left(1 - \frac{t}{10 \times T}\right) \quad (7)$$

où t représente l'itération courante, T le nombre total d'itérations, α_0 et σ_0 les valeurs initiales des paramètres. Cette adaptation permet une exploration intensive en début d'optimisation (valeurs élevées de α et σ) et une exploitation plus ciblée en fin de processus (valeurs réduites).

5.3.4 Gestion des contraintes discrètes

Problème de la continuité

L'application directe de l'équation de mouvement génère des valeurs réelles, alors que l'espace de recherche architectural est intrinsèquement discret. Cette incompatibilité nécessite des mécanismes de conversion adaptés.

Discrétisation stochastique

La conversion des valeurs réelles vers l'espace discret s'effectue par un processus d'arrondi probabiliste. Cette approche préserve la diversité en évitant un biais systématique vers les valeurs entières inférieures ou supérieures.

Validation des contraintes

Après chaque opération de mouvement, la validité de l'architecture résultante doit être vérifiée. Cette validation assure que :

- Les indices de types de couches respectent l'intervalle autorisé
- Les paramètres de chaque couche sont dans leur domaine de définition
- L'architecture résultante est physiquement réalisable

5.3.5 Algorithme proposé

L'algorithme 4 présente le pseudo-code de notre implémentation de l'algorithme Firefly amélioré :

Algorithm 4 Algorithme Firefly pour l'optimisation d'architectures CNN

Require: N: taille population, T: nb itérations, $\alpha_0, \beta_0, \gamma, \sigma_0, p$: paramètres

Ensure: Meilleure architecture

```
1:  $P_0 \leftarrow$  Générer N architectures aléatoires
2:  $\text{fitness}(P_0) \leftarrow$  Évaluer  $P_0$  en parallèle
3: for  $t = 1$  to  $T$  do
4:    $\alpha^{(t)} \leftarrow \alpha_0 \times (0.97)^t$ 
5:    $\sigma^{(t)} \leftarrow \sigma_0 \times (1 - \frac{t}{10T})$ 
6:   Trier  $P_{t-1}$  par fitness décroissante
7:    $P_{\text{new}} \leftarrow \emptyset$ 
8:   while  $|P_{\text{new}}| < N$  do
9:     for chaque luciole  $x_i$  dans  $P_{t-1}$  do
10:      for chaque luciole plus brillante  $x_j$  do
11:         $x_i^{\text{new}} \leftarrow x_i + \beta(\|x_i - x_j\|_2) \times (x_j - x_i) + \alpha^{(t)}\epsilon$ 
12:        if  $\text{random}() \leq p$  then
13:           $x_i^{\text{new}} \leftarrow x_i^{\text{new}} + \mathcal{N}(\mathbf{0}, (\sigma^{(t)})^2 \mathbf{I})$ 
14:        end if
15:         $x_i^{\text{new}} \leftarrow$  Discrétiser et valider( $x_i^{\text{new}}$ )
16:      break
17:    end for
18:    if architecture valide ET unique then
19:       $P_{\text{new}} \leftarrow P_{\text{new}} \cup \{x_i^{\text{new}}\}$ 
20:    end if
21:  end for
22: end while
23:  $\text{fitness}(P_{\text{new}}) \leftarrow$  Évaluer  $P_{\text{new}}$  en parallèle
24:  $P_t \leftarrow$  Sélectionner les N meilleures de  $P_{t-1} \cup P_{\text{new}}$ 
25: end for
26: return Meilleure architecture trouvée
```

6 Expériences et résultats

Afin d'évaluer les performances de deux algorithmes génétiques et firefly, nous avons mener des expériences sur deux jeux de données, un sous échantillons du jeu de données MNIST [1] incluant

5 classes choisis aléatoirement pour chaque expériences, nous avons ensuite mené une seule expérience sur le jeu données CIFAR-10 [14]. Ces choix ont été motivés par les contraintes de ressources computationnelles. Nous avons utiliser la recherche aléatoire comme méthode de référence (*baseline*) pour la comparaison. L’objectif est de maximiser une fonction de fitness définie comme suit :

$$f(\text{err}) = \frac{1}{1 + \text{err}} \quad (8)$$

où err est la moyenne de la perte (loss) calculée sur les ensembles d’entraînement et de test.

Les expériences ont été conduites en utilisant une approche parallèle :

- 6 cœurs CPU pour les expériences sur MNIST ;
- 4 GPU pour les expériences sur CIFAR-10.

6.1 Espace de recherche et configuration

L’espace de recherche est paramétré selon les éléments suivants :

Paramètre	MNIST	CIFAR-10
Nombre de couches (min–max)	2 à 10	2 à 10
Filtres convolutionnels	{1, 8, 16, 32}	{32, 64, 128, 256}
Tailles de noyau (kernel)	{2, 3, 5, 7}	{2, 3, 5, 7}
Strides	{1, 2, 3, 4}	{1, 2, 3, 4}
Padding convolutionnel	1	1
Padding de pooling	1	1
Fonctions d’activation	{ReLU, ELU, Sigmoid, Tanh}	{ReLU, ELU, Sigmoid, Tanh}
Taille des couches fully connected	{8 à 512} par pas irrégulier	{8 à 512} par pas irrégulier

Table 1: Espace de recherche défini pour MNIST et CIFAR-10.

6.2 Configuration des paramètres d’entraînement

Les paramètres utilisés pour l’entraînement et la recherche sont les suivants :

Paramètre	MNIST	CIFAR-10
Taille du batch	64	128
Nombre d’itérations de recherche	30	15
Taille de la population	20	20
Nombre d’époques (recherche)	10	10
Nombre d’époques (final)	30	50
Optimiseur utilisé	AdamW	AdamW
Forme de l’entrée	(1, 18, 18)	(3, 32, 32)
Nombre de classes	5	10
Nombre d’exemples train	30 524 en moyenne	60 000
Nombre d’exemples test	5 133 en moyenne	10 000
Taux d’apprentissage	0.001	0.001

Table 2: Paramètres d’entraînement utilisés pour les expériences.

Paramètre (Génétique)	Valeur	Paramètre (Luciole)	Valeur
Taux de mutation	0.1	α (facteur de randomisation)	0.5
Taille du tournoi	5	β_0 (attractivité initiale)	1.0
Probabilité de croisement	0.8	γ (absorption lumineuse)	1.0
Pression de sélection	1.5	σ_0 (écart-type initial)	1.0
		Probabilité d'utilisation du mouvement normal	0.5

Table 3: Paramètres spécifiques des algorithmes.

6.3 Protocole expérimental

Chaque expérimentation suit les étapes suivantes :

1. Génération aléatoire d'une population d'architectures ;
2. Évaluation de la population sur un sous-ensemble des données d'entraînement et de test ;
3. Application des mécanismes spécifique à chaque algorithmes;
4. Sauvegarde des meilleures architectures à chaque génération ;
5. Entraînement final de la meilleure architecture sur plusieurs époques ;
6. Évaluation finale sur l'ensemble de test complet.

6.4 Résultats

6.4.1 MNIST

Les expériences sur le dataset MNIST ont été conduites avec 10 graines aléatoires différentes (seeds 40 à 50, excluant le seed 43) pour chaque algorithme d'optimisation afin d'assurer la robustesse statistique des résultats. Chaque expérience a été menée sur un sous-échantillon de 5 classes choisies aléatoirement à partir du dataset MNIST original, comme décrit dans la section précédente.

Performances détaillées par algorithme Le tableau 4 présente les résultats obtenus par la recherche aléatoire.

Seed	Score	Précision test (%)	Perte test
40	0.9920	99.12	0.0267
41	0.9875	99.40	0.0244
42	0.9888	99.14	0.0342
44	0.9891	98.98	0.0343
45	0.9882	99.16	0.0315
46	0.9895	99.43	0.0251
47	0.9917	99.56	0.0128
48	0.9851	99.04	0.0366
49	0.9898	99.44	0.0151
50	0.9878	99.44	0.0230

Table 4: Résultats de la recherche aléatoire sur MNIST

Les résultats de l'algorithme génétique sont présentés dans le tableau 5.

Seed	Score	Précision test (%)	Perte test
40	0.9953	99.59	0.0114
41	0.9901	99.60	0.0161
42	0.9947	99.64	0.0124
44	0.9937	99.60	0.0109
45	0.9930	99.57	0.0145
46	0.9914	99.33	0.0303
47	0.9962	99.62	0.0145
48	0.9912	99.37	0.0161
49	0.9946	99.54	0.0151
50	0.9937	99.62	0.0109

Table 5: Résultats de l'algorithme génétique sur MNIST

Le tableau 6 présente les performances de l'algorithme Firefly.

Seed	Score	Précision test (%)	Perte test
40	0.9937	99.63	0.0109
41	0.9896	99.52	0.0152
42	0.9891	99.44	0.0239
44	0.9912	99.66	0.0144
45	0.9909	99.47	0.0156
46	0.9906	99.55	0.0157
47	0.9921	99.49	0.0151
48	0.9874	99.13	0.0397
49	0.9921	99.48	0.0156
50	0.9882	99.14	0.0355

Table 6: Résultats de l'algorithme Firefly sur MNIST

Analyse comparative des performances Le tableau 7 synthétise les performances moyennes obtenues par chaque algorithme d'optimisation, accompagnées des écarts-types pour évaluer la stabilité des résultats.

Méthode	Score moyen	Précision (%)	Perte moyenne	Écart-type
Recherche aléatoire	0.9890	99.27	0.0264	0.0021
Algorithme génétique	0.9934	99.55	0.0152	0.0019
Algorithme Firefly	0.9905	99.45	0.0212	0.0019

Table 7: Synthèse comparative des performances sur MNIST

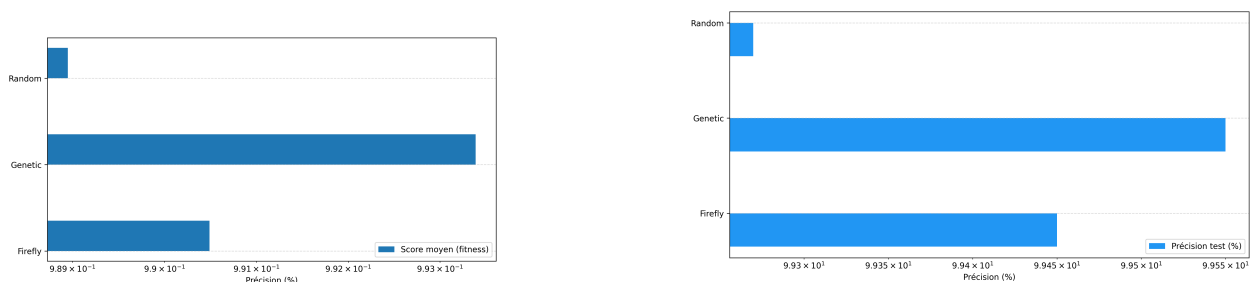


Figure 4: Comparaison des performances sur MNIST : (gauche) Score moyenne, (droite) Précision moyenne

L'analyse des résultats révèle une hiérarchie claire des performances. L'algorithme génétique obtient les meilleures performances avec un score de fitness moyen de 0.9934 et une précision de test de 99.55%. Cette supériorité se manifeste également par la perte de test la plus faible (0.0152), témoignant d'une meilleure capacité de généralisation des architectures découvertes.

L'algorithme Firefly se positionne en position intermédiaire avec un score moyen de 0.9905 et une précision de 99.45%. Bien que ses performances dépassent significativement celles de la recherche aléatoire, l'écart avec l'algorithme génétique demeure notable sur l'ensemble des métriques évaluées.

La recherche aléatoire, utilisée comme référence, atteint un score moyen de 0.9890 et une précision de 99.27%. Ces résultats, bien qu'élevés en valeur absolue, confirment l'intérêt des approches métaheuristiques pour l'optimisation d'architectures neurales.

Significance statistique des améliorations L'amélioration apportée par l'algorithme génétique par rapport à la recherche aléatoire se quantifie comme suit :

- Gain de 0.44 points de pourcentage en score de fitness
- Amélioration de 0.28 points de pourcentage en précision de test
- Réduction de 42.3% de la perte de test

La stabilité des résultats est confirmée par les faibles écarts-types observés (inférieurs à 0.0021 pour tous les algorithmes), attestant de la robustesse des conclusions tirées sur l'ensemble des graines aléatoires testées.

Ces résultats démontrent l'efficacité de l'optimisation par algorithme génétique pour la recherche automatique d'architectures de réseaux de neurones convolutionnels. Les gains obtenus, bien que modérés en valeur absolue compte tenu des performances déjà élevées sur MNIST, sont statistiquement significatifs et cohérents avec la complexité relativement faible de ce dataset de référence.

6.4.2 CIFAR-10

Les expériences sur le dataset CIFAR-10 ont été menées avec une configuration adaptée à la complexité accrue de ce dataset par rapport à MNIST. Une seule expérience a été réalisée en raison des contraintes de ressources computationnelles, utilisant 4 GPU pour l'entraînement parallèle comme spécifié dans la configuration expérimentale.

Performances de recherche d'architecture Le tableau 8 présente les performances obtenues par chaque algorithme lors de la phase de recherche d'architecture, incluant le score de fitness atteint et le nombre de modèles évalués.

Méthode	Score de fitness	Modèles évalués	Temps d'exécution
Recherche aléatoire	0.5904	194	~3h 22min
Algorithme génétique	0.6569	278	~5h 00min
Algorithme Firefly	0.6140	327	~6h 10min

Table 8: Performances des algorithmes lors de la recherche d'architecture sur CIFAR-10

L'algorithme génétique démontre une supériorité claire avec un score de fitness de 0.6569, soit une amélioration de 11.3% par rapport à la recherche aléatoire et de 7.0% par rapport à l'algorithme Firefly. Cette performance est obtenue avec un nombre modéré d'évaluations (278), témoignant de l'efficacité de l'exploration guidée par les mécanismes évolutionnaires.

Architectures optimales découvertes L'analyse des architectures optimales révèle des stratégies distinctes adoptées par chaque algorithme d'optimisation. Le tableau 9 présente la structure des meilleures architectures découvertes par chaque méthode.

Méthode	Architecture découverte
Recherche aléatoire	Conv(128 filtres, noyau 5×5, stride 2) → Conv(256, 5×5, stride 1) → MaxPool(2×2, stride 2) → Conv(64, 5×5, stride 1) → FC(224, ELU) → FC(80, Sigmoid)
Algorithme génétique	Conv(64, 3×3, stride 1) → Conv(256, 3×3, stride 2) → Conv(128, 3×3, stride 2) → Conv(128, 3×3, stride 1) → Conv(256, 3×3, stride 1) → FC(384, ReLU)
Algorithme Firefly	Conv(32, 2×2, stride 1) → Conv(32, 5×5, stride 1) → MaxPool(3×3, stride 1) → Conv(128, 2×2, stride 2) → Conv(128, 3×3, stride 3) → Conv(64, 5×5, stride 1) → MaxPool(3×3, stride 2)

Table 9: Architectures optimales découvertes sur CIFAR-10

Évaluation des performances finales Le tableau 10 présente les performances obtenues après entraînement complet des meilleures architectures découvertes.

Méthode	Précision train (%)	Perte train	Précision test (%)	Perte test
Recherche aléatoire	72.61	0.5222	79.95	0.5891
Algorithme génétique	77.94	0.3624	83.37	0.5280
Algorithme Firefly	74.73	0.4747	79.75	0.6034

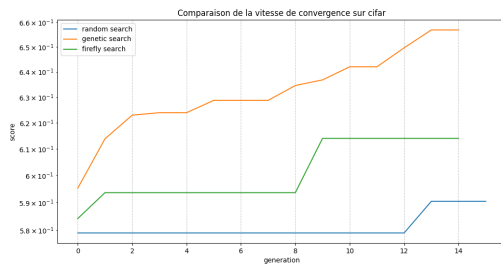
Table 10: Performances après entraînement standard (15 époques) sur CIFAR-10

L'évaluation avec un entraînement étendu sur un plus grand nombre d'époques(50 époques) révèle des performances encore supérieures, comme présenté dans le tableau 11.

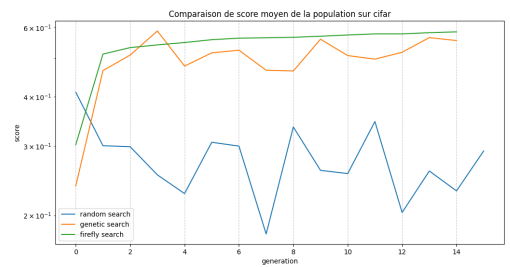
Méthode	Précision test (%)	Amélioration
Recherche aléatoire	82.68	+2.73 points
Algorithme génétique	85.41	+2.04 points
Algorithme Firefly	83.52	+3.77 points

Table 11: Performances avec entraînement étendu sur CIFAR-10

Analyse des courbes de convergence Les figures 5 illustrent le comportement des différents algorithmes au cours du processus d'optimisation.



(a) Évolution du meilleur score



(b) Score moyen de la population

Figure 5: Comparaison des courbes de convergence sur CIFAR-10

L'analyse des courbes de convergence révèle des patterns distincts entre les algorithmes. L'algorithme génétique présente une progression régulière et soutenue du meilleur score, atteignant une convergence stable vers la génération 12. La recherche aléatoire, en revanche, montre une stagnation précoce avec des améliorations marginales après les premières générations.

Le score moyen de la population (figure 5(b)) témoigne de la capacité des algorithmes métaheuristiques à maintenir une diversité de solutions de qualité. L'algorithme génétique et l'algorithme Firefly maintiennent des populations significativement plus performantes que la recherche aléatoire, avec des scores moyens respectifs de 0.55-0.60 contre 0.25-0.35 pour la recherche aléatoire.

Analyse comparative et signification statistique Les résultats sur CIFAR-10 confirment et amplifient les tendances observées sur MNIST. L'amélioration de 2.73 points de pourcentage en précision de test obtenue par l'algorithme génétique par rapport à la recherche aléatoire représente un gain relatif de 3.3%, ce qui constitue une amélioration substantielle dans le contexte de la classification d'images naturelles.

La robustesse de l'algorithme génétique se manifeste également par sa capacité à découvrir des architectures plus équilibrées, comme en témoigne l'écart réduit entre les performances d'entraînement et de test (77.94% vs 85.41%), suggérant une meilleure capacité de généralisation.

L'efficacité computationnelle constitue un autre avantage notable : bien que l'algorithme génétique nécessite plus d'évaluations que la recherche aléatoire (278 vs 194), il demeure plus efficace que l'algorithme Firefly (327 évaluations) tout en obtenant des performances supérieures.

Ces résultats démontrent l'intérêt pratique des algorithmes génétiques pour l'optimisation d'architectures neurales sur des tâches de vision par ordinateur de complexité réelle, où les gains de performance peuvent avoir un impact significatif sur les applications pratiques.

Conclusion

Ce travail a proposé une approche hybride innovante combinant la recherche d'architecture neuronale (NAS) et des algorithmes métaheuristiques inspirés des comportements naturels, tels que l'algorithme génétique et l'algorithme Firefly, pour l'optimisation des hyperparamètres structuraux des réseaux de neurones convolutionnels. Les résultats expérimentaux obtenus sur les jeux de données MNIST et CIFAR-10 mettent en évidence la supériorité des méthodes métaheuristiques par rapport à la recherche aléatoire, tant en termes de précision que de capacité de généralisation. L'algorithme génétique s'est particulièrement distingué par sa capacité à explorer efficacement l'espace de recherche et à éviter les optima locaux, tandis que l'algorithme Firefly a montré une bonne aptitude à maintenir la diversité des solutions. Au-delà des performances quantitatives, cette étude souligne l'importance de la représentation des architectures et de l'adaptation des opérateurs d'optimisation à la nature discrète et combinatoire du problème. L'intégration de NAS avec des métaheuristiques permet d'automatiser la conception de réseaux performants, tout en réduisant le coût computationnel associé à une exploration exhaustive.

Discussion des résultats

Les résultats obtenus dans ce travail, bien qu'ils permettent de conclure sur la comparaison des algorithmes testés, restent loin d'être prometteurs du point de vue des performances absolues sur les jeux de données utilisés. Les scores atteints, notamment sur CIFAR-10, sont nettement inférieurs à ceux rapportés dans la littérature pour des architectures optimisées à l'état de l'art. De plus, les expériences menées sont très limitées en termes de taille de population, de nombre d'itérations et de ressources computationnelles, ce qui ne permet pas une évaluation exhaustive ni une comparaison directe avec les méthodes les plus performantes du domaine. Ces limitations doivent être prises en compte dans l'interprétation des résultats et invitent à considérer ce travail comme une preuve de concept plutôt qu'une solution compétitive.

Avantages de l'approche utilisée

L'approche hybride proposée présente néanmoins plusieurs avantages notables. Elle permet d'automatiser le processus d'optimisation des architectures de réseaux de neurones, réduisant ainsi la dépendance à l'expertise humaine et le temps nécessaire à la conception manuelle. L'utilisation d'algorithmes métaheuristiques, tels que l'algorithme génétique et l'algorithme Firefly, offre une exploration efficace de vastes espaces de recherche, souvent inaccessibles aux méthodes classiques. Cette automatisation accélère le développement de modèles adaptés à des tâches spécifiques et facilite l'adaptation à de

nouveaux jeux de données ou contraintes applicatives. De plus, la flexibilité de l'approche permet d'intégrer facilement d'autres critères d'optimisation, tels que la complexité du modèle ou la consommation de ressources.

Limitations

Ce travail présente plusieurs limitations importantes. Tout d'abord, les ressources computationnelles disponibles ont fortement restreint la taille des populations, le nombre d'itérations et la diversité des expériences menées. Notre étude s'est également limitée à l'optimisation des hyperparamètres structurels des CNNs, sans explorer d'autres aspects tels que l'optimisation conjointe des paramètres d'entraînement ou la prise en compte de contraintes matérielles. La représentation de l'espace de recherche adoptée reste basique, alors qu'il existe des configurations plus robustes et expressives qui n'ont pas été explorées ici. Par ailleurs, l'algorithme Firefly [8] a été particulièrement pénalisé par la nature discrète de l'espace de recherche : les opérations euclidiennes classiques ne sont pas directement applicables, et il a fallu recourir à des mécanismes d'arrondi aléatoire pour adapter l'algorithme, ce qui a pu limiter son efficacité.

Travaux futurs

Plusieurs axes d'amélioration peuvent être envisagés pour les travaux futurs. Il serait pertinent d'explorer d'autres algorithmes d'optimisation basés sur l'intelligence en essaim, tels que l'optimisation par essaim de particules (PSO [7]) ou les algorithmes de colonies de fourmis (ACO [19]). L'étude de représentations plus riches et plus robustes de l'espace de recherche pourrait également permettre de découvrir des architectures plus performantes. L'intégration de techniques d'accélération de la recherche, comme le weight sharing [20] ou l'évaluation partielle des architectures [21], permettrait de tester un plus grand nombre de configurations en un temps réduit. Enfin, il serait essentiel de valider l'approche sur de véritables benchmarks de la communauté et de comparer systématiquement les résultats obtenus à l'état de l'art, afin d'évaluer le potentiel réel de la méthode proposée.

References

- [1] Y. LeCun, B. Boser, J. S. Denker, D. Henderson, R. E. Howard, W. Hubbard, and L. D. Jackel, "Backpropagation applied to handwritten zip code recognition," *Neural computation*, vol. 1, no. 4, pp. 541–551, 1989. 1, 12
- [2] J. Bergstra and Y. Bengio, "Random search for hyper-parameter optimization," *Journal of Machine Learning Research*, vol. 13, no. 10, pp. 281–305, 2012. [Online]. Available: <http://jmlr.org/papers/v13/bergstra12a.html> 1, 2
- [3] J. Mockus, "The application of bayesian methods for seeking the extremum," *Towards global optimization*, vol. 2, p. 117, 1998. 1, 2
- [4] S. A. Cook, "The complexity of theorem-proving procedures," in *Proceedings of the Third Annual ACM Symposium on Theory of Computing*, ser. STOC '71. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 1971, p. 151–158. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1145/800157.805047> 1, 2
- [5] L. Xie and A. Yuille, "Genetic cnn," in *Proceedings of the IEEE international conference on computer vision*, 2017, pp. 1379–1388. 1, 2, 4
- [6] A. Cheraghalipour, M. Hajiaghaei-Keshteli, and M. M. Paydar, "Tree growth algorithm (tga): A novel approach for solving optimization problems," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 72, pp. 393–414, 2018. 1

- [7] J. Kennedy and R. Eberhart, "Particle swarm optimization," in *Proceedings of ICNN'95-international conference on neural networks*, vol. 4. iee, 1995, pp. 1942–1948. 1, 2, 19
- [8] X.-S. Yang, "Firefly algorithms for multimodal optimization," in *Stochastic Algorithms: Foundations and Applications*, O. Watanabe and T. Zeugmann, Eds. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009, pp. 169–178. 1, 2, 9, 19
- [9] B. Zoph and Q. V. Le, "Neural architecture search with reinforcement learning," *arXiv preprint arXiv:1611.01578*, 2016. 2
- [10] C. Liu, B. Zoph, M. Neumann, J. Shlens, W. Hua, L.-J. Li, L. Fei-Fei, A. Yuille, J. Huang, and K. Murphy, "Progressive neural architecture search," in *Proceedings of the European Conference on Computer Vision (ECCV)*, September 2018. 2
- [11] M. Tan and Q. Le, "EfficientNet: Rethinking model scaling for convolutional neural networks," in *Proceedings of the 36th International Conference on Machine Learning*, ser. Proceedings of Machine Learning Research, K. Chaudhuri and R. Salakhutdinov, Eds., vol. 97. PMLR, 09–15 Jun 2019, pp. 6105–6114. [Online]. Available: <https://proceedings.mlr.press/v97/tan19a.html> 2
- [12] J. Bergstra and Y. Bengio, "Random search for hyper-parameter optimization," *J. Mach. Learn. Res.*, vol. 13, no. null, p. 281–305, Feb. 2012. 2
- [13] J. Wu, X.-Y. Chen, H. Zhang, L.-D. Xiong, H. Lei, and S.-H. Deng, "Hyperparameter optimization for machine learning models based on bayesian optimizationb," *Journal of Electronic Science and Technology*, vol. 17, no. 1, pp. 26–40, 2019. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1674862X19300047> 2
- [14] A. Krizhevsky, G. Hinton *et al.*, "Learning multiple layers of features from tiny images," 2009. 2, 13
- [15] L. Wen, L. Gao, X. Li, and H. Li, "A new genetic algorithm based evolutionary neural architecture search for image classification," *Swarm and Evolutionary Computation*, vol. 75, p. 101191, 2022. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210650222001547> 3
- [16] E. Bala and W. Pang, "Deepswarm: Optimising convolutional neural networks using swarm intelligence," in *Advances in Computational Intelligence Systems*, Z. Ju, L. Yang, C. Yang, A. Gegov, and D. Zhou, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2020, pp. 119–130. 3
- [17] K. Hingee and M. Hutter, "Equivalence of probabilistic tournament and polynomial ranking selection," in *2008 IEEE Congress on Evolutionary Computation (IEEE World Congress on Computational Intelligence)*, 2008, pp. 564–571. 5
- [18] N. Bacanin, T. Bezdan, E. Tuba, I. Strumberger, and M. Tuba, "Optimizing convolutional neural network hyperparameters by enhanced swarm intelligence metaheuristics," *Algorithms*, vol. 13, no. 3, p. 67, 2020. 11
- [19] C. Blum, "Ant colony optimization: Introduction and recent trends," *Physics of Life reviews*, vol. 2, no. 4, pp. 353–373, 2005. 19
- [20] H. Pham, M. Guan, B. Zoph, Q. Le, and J. Dean, "Efficient neural architecture search via parameters sharing," in *International conference on machine learning*. PMLR, 2018, pp. 4095–4104. 19
- [21] A. Klein, S. Falkner, S. Bartels, P. Hennig, and F. Hutter, "Fast bayesian optimization of machine learning hyperparameters on large datasets," in *Artificial intelligence and statistics*. PMLR, 2017, pp. 528–536. 19