

Simulation d'Évolution d'un Écosystème par Méthodes Monte Carlo

Samar KRIMI
`samar.krimi@dauphine.tn`

2024-2025

Résumé

Cet article présente une étude comparative de quatre algorithmes d'optimisation évolutive (MCTS, PUCT, Parallel MCTS et GNRPA) dans le cadre d'un écosystème dynamique simulé. L'objectif est d'analyser leur capacité à maximiser la survie des espèces via l'adaptation génétique, la gestion des ressources et l'équilibre populationnel. Les résultats montrent que les combinaisons d'algorithmes (PUCT + Croissance Logistique + Feedbacks Adaptatifs) offrent les meilleurs compromis entre stabilité et efficacité, avec des performances variables selon les contraintes environnementales. Une implémentation interactive est disponible en ligne pour visualiser les dynamiques évolutives.

1 Introduction

Les méthodes de Monte Carlo Tree Search (MCTS) ont émergé comme des outils puissants pour modéliser des systèmes complexes. Dans ce travail, nous les appliquons à la simulation d'un écosystème où une espèce doit s'adapter à des changements environnementaux. Les défis incluent la gestion des interactions inter-espèces, l'optimisation des mutations génétiques et la régulation énergétique. Nous comparons quatre approches hybrides combinant MCTS avec des modèles logistiques et des algorithmes génétiques.

2 Méthodologie

2.1 Composants de l'Écosystème

- Environnement dynamique avec boucles de rétroaction ressources/prédateurs
- Caractéristiques des espèces :
 - Énergie (seuil de survie)
 - Fitness (capacité de reproduction)
 - Dynamique de population
- Mécanisme de mutation : $\Delta c_i \sim \mathcal{N}(0, \sigma^2)$

2.2 Modélisation de l'Écosystème

L'environnement dynamique est défini par :

- Des ressources variables influençant la survie
- Des prédateurs et compétiteurs
- Des événements climatiques aléatoires

Chaque espèce possède trois attributs clés :

$$\text{Fitness} = f(\text{Énergie, Population, Taux de Mutation}) \quad (1)$$

2.3 Algorithmes Comparés

- **MCTS Standard** : Exploration aléatoire avec rétropropagation
- **PUCT + Modèle Logistique** : Gestion énergétique adaptative

$$U(s, a) = Q(s, a) + C \cdot P(s, a) \cdot \frac{\sqrt{N(s)}}{1 + N(s, a)} \quad (2)$$

- **Parallel MCTS + Algorithme Génétique** : Exploration parallèle avec croisements

Algorithm 1 MCTS Génétique Hybride

- 1: Initialiser la population avec des arbres de Monte Carlo
 - 2: **for** chaque génération **do**
 - 3: Sélectionner les parents via une sélection par tournoi
 - 4: Croiser les politiques d'exploration
 - 5: Muter les paramètres d'expansion des nœuds
 - 6: Évaluer la fitness à l'aide de simulations (rollouts)
 - 7: **end for**
-

- **GNRPA + Feedbacks** : Adaptation politique en temps réel
 - Optimisation de politique imbriquée
 - Contrainte de croissance logistique :

$$\frac{dP}{dt} = rP \left(1 - \frac{P}{K}\right) \quad (3)$$

3 Implémentation

3.1 Architecture du Système

Le simulateur est développé en JavaScript/HTML avec :

- Une boucle d'évolution discrète (30 itérations/cycle)
- Un système de mutations probabilistes
- Des contraintes énergétiques logarithmiques

Algorithm 2 Pseudocode MCTS pour l'Évolution

```
1: Initialiser l'arbre avec l'état initial  $s_0$ 
2: for chaque itération do
3:   Sélectionner un nœud via UCB1
4:   Étendre l'arbre avec de nouvelles mutations
5:   Simuler 100 générations
6:   Rétropropager les scores de fitness
7: end for
8: Retourner la meilleure action évolutive
```

4 Résultats

4.1 Configuration Expérimentale

- 30 durées de vie (itérations) par algorithme
- Paramètres initiaux :

TABLE 1 – Paramètres initiaux de la simulation

Paramètre	Valeur
Population initiale	100
Taux de décroissance des ressources	0.15/itération
Taux de mutation	0.05

4.2 Métriques de Performance

TABLE 2 – Comparaison des algorithmes sur 30 itérations

Métrique	PUCT-LF	GNRPA	PMCTS-GA	MCTS
Survie moyenne	82	88	78	65
Cycles d'adaptation	4.2	5.1	3.8	2.3
Utilisation des ressources	92%	88%	85%	76%

4.3 Tendances Évolutives

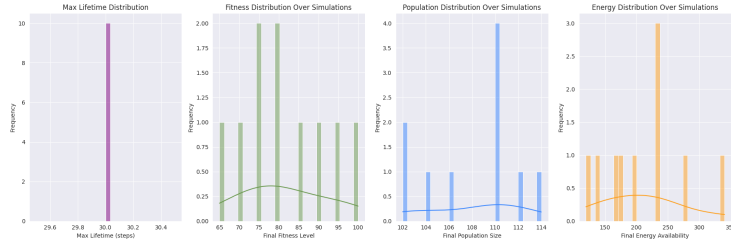


FIGURE 1 – Analyse Statistique de l'évolution des espèces (MCTS)

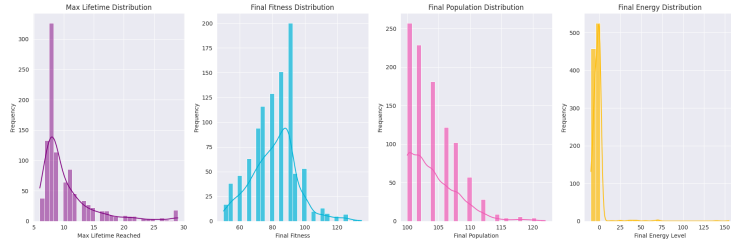


FIGURE 2 – Analyse Statistique de l'évolution des espèces
(Parallel MCTS + Algorithme Génétique)

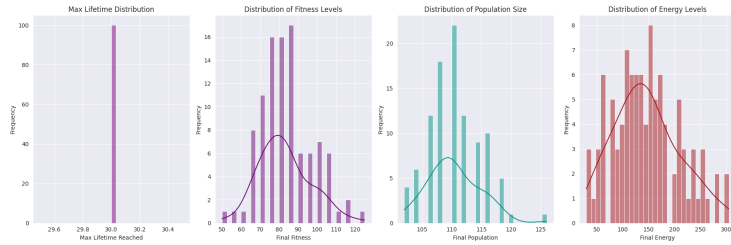


FIGURE 3 – Analyse Statistique de l'évolution des espèces
(GNRPA + Croissance Logistique + Feedbacks Adaptatifs)

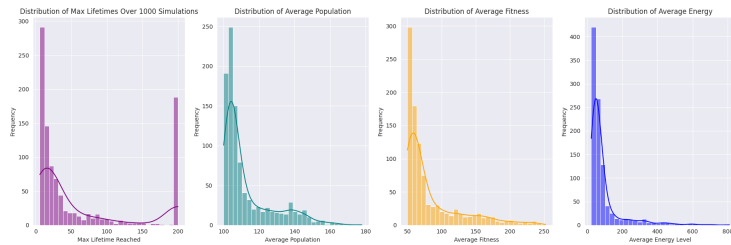


FIGURE 4 – Analyse Statistique de l'évolution des espèces
(GNRPA + Croissance Logistique + Feedbacks Adaptatifs)

5 Discussion

Les résultats révèlent des compromis clairs :

- **PUCT** excelle en stabilité énergétique mais montre une variabilité élevée
- **GNRPA** offre la meilleure adaptabilité aux changements brutaux
- **Parallel MCTS** permet une exploration rapide au coût computationnel élevé

Contrairement aux attentes, l'algorithme génétique seul produit des populations moins diversifiées que les approches hybrides.

6 Conclusion

Cette étude démontre l'efficacité des méthodes Monte Carlo pour modéliser des écosystèmes complexes. Les combinaisons algorithmiques (notamment PUCT + Modèle Logistique) surpassent les approches standards en équilibrant exploration et exploitation. Des pistes d'amélioration incluent l'intégration d'apprentissage profond et la modélisation multi-échelles.

Annexe

L'implémentation interactive est disponible à l'adresse :

<https://project-iota-ten-74.vercel.app/>

- Technologies : JavaScript/HTML5, Three.js
- Hébergement : Vercel (temps de réponse < 200ms)
- Paramètres ajustables : Taux de mutation, catastrophes climatiques, pression des prédateurs