

C++ for Finance : A multiple type Option Pricer

Benjamin Emily, Simon Carrière, Martin Verscheld, Hiba ElQoraichy

November 28, 2025

Introduction

Black Scholes Monte Carlo Pricer

Interface publique et état interne.

Constructeur. `BlackScholesMCPricer(...)`

Il valide l'option (option non nulle), récupère une fois pour toutes les instants de monitoring (`time_steps_`) :

- si l'option est asiatique.
- sinon, un unique pas à l'échéance (`expiry`).

Les temps doivent être non décroissants et le dernier doit coïncider avec l'échéance (sinon exception). Pour chaque intervalle Δt , on pré-calcule deux quantités:

$$\text{drift_dt_[i]} = \left(r - \frac{1}{2}\sigma^2\right)\Delta t,$$
$$\text{vol_sqrt_dt_[i]} = \sigma\sqrt{\Delta t},$$

afin d'éviter de recalculer les mêmes produits à chaque trajectoire.

Compteur de trajectoires. L'attribut privé `nb_paths_` compte le *nombre total* de trajectoires générées depuis la création de l'objet. `getNbPaths()` donne un accès lecture à ce compteur.

Estimateur en ligne. On maintient `estimate_` (moyenne), `M2_` (somme des carrés centrés) et `nb_paths_`. Ils sont mis à jour de façon incrémentale, *sans stocker* les trajectoires dans l'objet (conforme à la consigne).

A. Génération et parallélisme : `generate(nb_paths)`.

Principe général. Un appel à `generate(nb_paths)` ajoute *nb_paths nouvelles trajectoires* à l'estimateur courant (on peut appeler plusieurs fois pour accumuler).

Découpage multi-thread. On choisit

```
thread_count = min(nb_paths, hardware_concurrency()),
```

où `hardware_concurrency()` est le *nombre indicatif de cœurs matériels* selon la STL. Les `nb_paths` sont réparties en *chunks* quasi égaux (`base + distribution du remainder`). Chaque thread lance `simulate_chunk(paths)` et renvoie des statistiques locales (pas de partage d'état pendant la simulation, donc pas de verrou).

Simulation d'un chunk. On simule des paires *antithétiques*: à chaque pas, on tire $Z \sim \mathcal{N}(0, 1)$ via `MT::rand_norm()` et on avance deux chemins en parallèle:

$$S \leftarrow S \times \exp(\text{drift} + \text{vol} \cdot Z) \quad \text{et} \quad S \leftarrow S \times \exp(\text{drift} - \text{vol} \cdot Z).$$

Antithétiques = technique de *réduction de variance*: coupler Z et $-Z$ annule une partie de l'aléa. On remplit deux buffers `path_pos` et `path_neg` *locaux au thread* pour donner le chemin à `payoffPath`. Pour une européenne, seul le dernier point

est utilisé par le payoff; pour une asiatique, toute la trajectoire est lue. Le payoff est actualisé par e^{-rT} (multiplicateur d'*actualisation*).

Les tirages pseudo-aléatoires proviennent d'un moteur Mersenne `thread_local`: chaque thread dispose de son générateur, éliminant toute contention ou data race sur le RNG.

Contrôle variate (vanilles). Si l'option est une vanille européenne, on active un contrôle variate parfait: on calcule une fois le prix Black-Scholes fermé et, pour chaque trajectoire, on remplace l'échantillon par `payoff - payoff + prix_BS` (variance quasi nulle et prix identique à la formule). Pour les options path-dépendantes ou américaines, le contrôle n'est pas utilisé et l'estimateur reste purement Monte Carlo.

B. Statistiques en ligne et agrégation.

Structure locale. Chaque thread retourne un triplet compact:

```
long long n; double mean; double M2;
```

- `n` : nombre d'échantillons produits par le thread,
- `mean` : moyenne en ligne (algorithme de **Welford**),
- `M2` : somme des carrés centrés, utile pour la variance $s^2 = M2/(n - 1)$.

Welford (définition). Méthode *numériquement stable* pour mettre à jour moyenne et variance sans conserver tous les échantillons:

$$\mu_k = \mu_{k-1} + \frac{x_k - \mu_{k-1}}{k},$$

$$M2_k = M2_{k-1} + (x_k - \mu_{k-1})(x_k - \mu_k).$$

Fusion parallèle (Chan). On fusionne les agrégats d'un thread `b` dans l'agrégat global `a` via:

$$\mu \leftarrow \mu_a + \delta \frac{n_b}{n_a + n_b}, \quad M2 \leftarrow M2_a + M2_b + \delta^2 \frac{n_a n_b}{n_a + n_b},$$

avec $\delta = \mu_b - \mu_a$. C'est *thread-safe* car chaque thread calcule d'abord ses statistiques *locales*, puis on agrège séquentiellement.

C. Différences.

- *Differences/plus* : parallélisation multi-threads, tirages `thread_local` (sécurisés en présence de threads), validation stricte des dates de monitoring, antithétiques et estimation en ligne sans stockage.

