Direct Meet-in-the-Middle Attack

Julian Mouthon, Mario Razafinony

28 décembre 2025

Résumé

Ce rapport présente la parallèlisation d'un code d'attaque *Meet-in-the-Middle* (MitM) en utilisant MPI et OpenMP.

Table des matières

1 Introduction

L'attaque *Meet-in-the-Middle* est une technique qui exploite la possibilité de diviser un chiffrement en deux parties indépendantes. Le but est de chercher des paires de clés (k_1, k_2) telles que :

$$\mathrm{Enc}_{k_1}(\mathrm{Enc}_{k_2}(P_1)) = C_1 \quad \text{et} \quad \mathrm{Enc}_{k_1}(P_0) = \mathrm{Dec}_{k_2}(C_0)$$

où (P_0, C_0) et (P_1, C_1) sont deux paires texte clair-chiffré connues.

2 Parallèlisation

Pour maximiser les performances, nous combinons plusieurs niveaux de parallélisme :

— **MPI** : parallélisme multi-processus
— **OpenMP** : parallélisme multi-thread
— **Sharding** : distribution du dictionnaire entre processus
— **Vectorisation** : TODO

2.1 Distribution des données

Le sharding est réalisé par fonction de hachage :

$$\text{shard\_id} = h(\text{clé}) \bmod P$$

où P est le nombre de processus MPI. Cela garantit une distribution uniforme des données entre les processus.

2.2 Vectorisation

Nous avons utilisé `#pragma omp parallel for simd` pour l'initialisation des tableaux :

```
#pragma omp parallel for simd
for (u64 i = 0; i < local_dict_size; i++) {
    local_A[i].k = EMPTY;
}
```

Cela permet au compilateur de générer des instructions pour que le processeur puisse traiter plusieurs éléments à la fois.

3 Phases de l'algorithme

3.1 Phase 1 : Construction distribuée du dictionnaire

3.1.1 Objectif

Construire un dictionnaire distribué associant chaque image $f(x) = \text{Enc}_x(P_0)$ à sa préimage x.

3.1.2 Étapes détaillées

1. **Partitionnement de l'espace des clés** :
   — Chaque processus MPI traite un sous-ensemble des clés :$\{x \mid x = \text{rank mod (world\_size)}\}$
   — Chaque thread OpenMP traite une partie de ce sous-ensemble
2. **Calcul local des paires (image, préimage)** : Pour chaque clé x assignée :

$$z = f(x) = \text{Enc}_x(P_0) \quad \text{où} \quad z \in \{0,1\}^n$$

   — Si z appartient au shard local : insertion directe
   — Sinon : on le met dans buffer pour l'envoyer au processus propriétaire plus tard
3. **Échange asynchrone des données** :
   1: **Chaque processus :**
   2: Calcule `send_counts[i]` = nombre d'éléments pour le processus i
   3: `MPI_Alltoall` : échange des comptes entre tous les processus
   4: `MPI_Irecv` : poste toutes les réceptions de manière asynchrone
   5: `MPI_Isend` : envoie toutes les données de manière asynchrone
   6: `MPI_Wait` : attend que toutes les réceptions soient terminées
   7: Traite les données reçues (insertion dans le dictionnaire)
   8: `MPI_Wait` : attend que tous les envois soient terminés
4. **Insertion dans les tables de hachage locales**

3.2 Phase 2 : Recherche de collisions

3.2.1 Objectif

Trouver toutes les paires (x, z) telles que :

$$f(x) = g(z) \quad \text{et} \quad \text{Enc}_x(\text{Enc}_z(P_1)) = C_1$$

3.2.2 Étapes détaillées

1. **Calcul local des images inverses** : Pour chaque z assigné au processus :

$$y = g(z) = \mathrm{Dec}_z(C_0)$$

   — Si y appartient au shard local : recherche locale dans le dictionnaire
   — Sinon : mise en buffer pour interrogation à distance

2. **Recherche distribuée des collisions** :
   — Interrogation du dictionnaire avec y comme clé
   — Pour chaque x trouvé : vérification de la deuxième paire (P_1, C_1)
   — Utilisation de la fonction `is_good_pair()` pour validation

3. **Échange asynchrone des requêtes** : Même schéma que la Phase 1 mais avec :
   — Envoi des paires (y, z) aux propriétaires de y
   — Réception et traitement des résultats
   — Tag différent (2) pour distinguer des communications de la Phase 1

4. **Vérification complète des paires** : Pour chaque collision candidate (x, z) :

$$\text{vérifier si } \mathrm{Enc}_x(\mathrm{Enc}_z(P_1)) = C_1$$

   — Test complet avec les deux clés
   — Filtrage des faux positifs
   — Arrêt après avoir trouvé `maxres` solutions

3.3 Phase 3 : Agrégation des résultats

3.3.1 Objectif

Rassembler toutes les solutions trouvées sur le processus racine (rank 0).

3.3.2 Étapes détaillées

1. **Collecte des comptes** :

```
MPI_Gather(&nres_local, 1, MPI_UINT64_T,
           all_nres, 1, MPI_UINT64_T, 0, MPI_COMM_WORLD);
```

   Chaque processus envoie son nombre de solutions au processus 0.

2. **Collecte des solutions** :

```
MPI_Gatherv(local_k1, nres_local, MPI_UINT64_T,
            global_k1, counts, displs, MPI_UINT64_T, 0);
MPI_Gatherv(local_k2, nres_local, MPI_UINT64_T,
            global_k2, counts, displs, MPI_UINT64_T, 0);
```

   Collecte avec déplacements variables pour gérer des nombres de solutions différents.

3. **Validation finale** (rank 0 uniquement) :
   — Vérification que $f(k_1) = g(k_2)$ pour chaque paire
   — Vérification complète avec la deuxième paire (P_1, C_1)
   — Affichage des solutions valides

4 Algorithme principal

Algorithm 1 Algorithme golden_claw_search

```
1: procedure GOLDEN_CLAW_SEARCH(maxres, k1[], k2[])
2:     Phase 1 : Construction du dictionnaire
3:     for x tel que x ≡ rank (mod world_size) do
4:         z ← f(x)
5:         shard ← z mod world_size
6:         if shard = rank then
7:             SHARD_DICT_INSERT(z, x)
8:         else
9:             Ajouter (z, x) à buffer pour processus shard
10:        end if
11:    end for
12:    Échanger les buffers entre tous les processus
13:    Phase 2 : Recherche de collisions
14:    for z tel que z ≡ rank (mod world_size) do
15:        y ← g(z)
16:        shard ← y mod world_size
17:        if shard = rank then
18:            X ← SHARD_PROBE_LOCAL(y)
19:            for x ∈ X do
20:                if IS_GOOD_PAIR(x, z) then
21:                    Ajouter (x, z) aux résultats locaux
22:                end if
23:            end for
24:        else
25:            Ajouter (y, z) à buffer pour processus shard
26:        end if
27:    end for
28:    Échanger et traiter les buffers
29:    Phase 3 : Agrégation des résultats
30:    Collecter tous les résultats sur le processus 0
31:    return solutions trouvées
32: end procedure
```

5 Difficultés rencontrées

La parallélisation s'est révélée plus complexe que prévu. Avant d'aboutir à la version finale présentée dans ce rapport, plusieurs approches ont été explorées et abandonnées en raison de performances insuffisantes.

5.1 Approche Boss-Workers

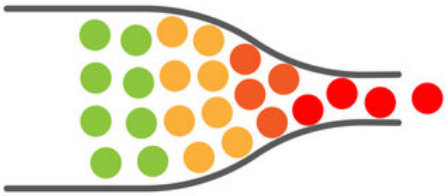
Une première implémentation reposait sur un schéma *boss-workers* :

— un processus maître distribuait dynamiquement des blocs de clés aux travailleurs,
— les travailleurs effectuaient les calculs puis renvoyaient leurs résultats au maître.

Cette approche s'est révélée être contre-productive pour plusieurs raisons :

— le processus maître devenait rapidement un **goulot d'étranglement**.
— les communications étaient très fréquentes et de petite taille, ce qui augmentait la latence MPI
— la charge de messages et de synchronisations annulaient complètement les bénéfices du parallélisme.

Le Boss avait besoin de beaucoup de mémoire RAM, et il y a avait de nombreux workers. Cela créait un scénario de 'botttleneck'.



Cette version parallèle était bien **plus lente que le code séquentiel**.

5.2 Communications à chaque itération

Une deuxième tentative était proche de la version finale, mais avec une stratégie de communication différente :

— chaque paire (z, x) ou (y, z) était envoyée immédiatement à son processus propriétaire à l'aide de `MPI_Send`,
— les communications étaient donc déclenchées à chaque itération de boucle

Cette version a rapidement montré ses limites :

— elle générait un **nombre extrêmement élevé de messages MPI** et de petites tailles.
— le coût de gestion des communications dominait le temps de calcul
— la saturation du réseau dégradait les performances

Cette version était aussi bien **plus lente que le code séquentiel**.