DOCUMENTATION TECHNIQUE

Ordonnanceur Multitâche de Processus sous Linux

Mini-Projet : Systèmes d'Exploitation

Octobre - Décembre 2025

Équipe de Développement

Arij Sebai • Aya Sakroufi • Balkis Hanafi
Hadil Hasni • Wiem Ayari

L'Institut séperieur d'informatique à Ariana
1ING3

⚠️ CONVENTION IMPORTANTE : Priorités

La convention de priorité utilisée dans ce projet est la convention UNIX :

$$\text{Petite Valeur} > \text{Grande Valeur}$$

Exemples :

- Priority 0 > Priority 1 > Priority 5 > Priority 10
- Un processus avec `priority = 0` a PLUS de priorité qu'un avec `priority = 5`

Mode Ascending (défaut) : Applique cette convention Unix

- Utilisé automatiquement pour tous les algorithmes de priorité
- Peut être explicité via `--prio-order asc` en mode API

Mode Descending (optionnel) : Inverse la convention

- Grande valeur = haute priorité (moins intuitif pour Unix)
- Activable via `--prio-order desc` en mode API

⚠️ **Ne pas confondre** avec le mode "aging" ou "dynamique" :

- **Ascending/Descending** = convention de comparaison des valeurs
- **Statique/Dynamique** = changement de priorité avec le temps

Table des Matières

---

1. Introduction

Objectif du Projet

Ce projet vise à concevoir et réaliser un **simulateur d'ordonnancement de processus sous Linux** en langage C. L'objectif est d'offrir un outil pédagogique permettant de :

- ✅ **Générer ou lire** un jeu de processus (fichier texte configurable)
- ✅ **Appliquer plusieurs politiques** d'ordonnancement :
  - FIFO (First-In First-Out)
  - Round-Robin avec quantum configurable
  - Priorité préemptive (modes croissant/décroissant)
  - SRT (Shortest Remaining Time)
  - Multilevel Queue (statique)
  - Multilevel Dynamic (avec aging anti-famine)
- ✅ **Collecter des métriques** : temps d'attente, temps de réponse, temps de tour, utilisation CPU
- ✅ **Afficher les résultats** : console et diagramme de Gantt
- ✅ **Être modulaire, configurable et extensible**

2. Choix des Structures de Données

2.1 Justification des Structures Principales

Structure `process` : Le Cœur du Système

```c
#define NAME_LEN 64
#define READY 0
#define RUNNING 1
#define BLOCKED 2
#define ZOMBIE 3

struct process {
    char name[NAME_LEN];        // Identification unique
    int arrival_time;           // Moment d'arrivée en système
    int exec_time;              // Durée totale CPU requise (immuable)
    int priority;               // Priorité statique (PETITE VALEUR = HAUTE
PRIORITÉ, convention Unix)
    int remaining_time;         // Temps restant à exécuter (modifiable)
    int waiting_time;           // Temps d'attente cumulé
    int status;                 // État : READY(0), RUNNING(1), BLOCKED(2),
ZOMBIE(3)
    int end_time;               // Temps de fin d'exécution (pour
métriques)
    int wait_time;              // Pour aging dynamique (Multilevel)
};
```

Justification de Chaque Champ

Champ	Justification	Algorithmes Utilisateurs
`name[64]`	Identification lisible (P1, ProcessA, etc.)	Tous (affichage)
`arrival_time`	Détermine quand le processus devient READY	FIFO, Priority, RR, Multilevel
`exec_time`	Durée immuable totale	Métriques (calcul temps attente)
`priority`	Support ordonnancement hiérarchique (**Petite valeur = haute priorité**, convention Unix)	Priority, Multilevel
`remaining_time`	Temps à exécuter (modifiable)	SRT, Priority, RR, Multilevel
`waiting_time`	Métrique cumulative d'attente	Métriques finales
`status`	Gestion des états (READY, RUNNING, ZOMBIE)	Tous les ordonnanceurs
`end_time`	Date de fin (pour turnaround time)	Métriques (calcul efficacité)
`wait_time`	Temps d'attente pour aging dynamique	Multilevel Dynamic (anti-famine)

2.2 Représentation des Données : Tableau Dynamique

Structure Générale

```
struct process *processes;  // Pointeur vers tableau dynamique
int num_processes;          // Nombre de processus chargés
```

Allocation au runtime :

```
processes = malloc(num_processes * sizeof(struct process));
if (!processes) { /* erreur allocation */ }
```

2.3 Représentation Implicite de la Ready Queue

On utilise une représentation implicite :

```
for (int i = 0; i < n; i++) {
    if (procs[i].arrival_time <= time &&
        procs[i].remaining_time > 0 &&
        procs[i].status == READY) {
```

```
            selected = i;
            break;
        }
    }
```

Avantages de l'Approche Implicite

- ✅ **Zéro surcharge mémoire** supplémentaire
- ✅ **Code plus lisible** et directement mappable à l'OS réel
- ✅ **Flexibilité** : chaque politique définit son critère de "ready"
- ✅ **Pas de synchronisation** complexe entre structures

3. Choix des Algorithmes d'Ordonnancement

3.1 FIFO (First-In First-Out)

Principe

C'est une politique **non-préemptive**. Le processus arrivé le premier (`arrival_time` le plus bas) est sélectionné et s'exécute jusqu'à sa fin complète sans interruption.

Algorithme de Sélection et Simulation

Étape 1 : Définir une fonction de sélection FIFO (fifo_scheduler)

Cette fonction est responsable de trouver quel processus exécuter.

À l'intérieur de cette fonction :

1.1. Préparer la recherche du processus éligible

- Initialiser un indice "meilleur processus" à -1 (vide)
- Initialiser une variable "temps d'arrivée le plus tôt" à une valeur très élevée (INT_MAX)

1.2. Parcourir tous les processus du système

- **1.2.1.** Sélectionner uniquement les processus "prêts" : ceux qui sont déjà arrivés (`arrival_time <= time`) ET qui n'ont pas encore terminé (`remaining_time > 0`)
- **1.2.2.** Parmi ces processus prêts, comparer leur `arrival_time` avec le "temps d'arrivée le plus tôt" trouvé jusqu'à présent
- **1.2.3.** Si un processus est trouvé avec un `arrival_time` plus bas, le marquer comme le nouveau "meilleur processus"

1.3. Retourner l'indice du processus le plus anciennement arrivé

- Retourner l'index du "meilleur processus" (ou -1 si aucun processus n'est prêt)

Étape 2 : Intégrer cette sélection dans la boucle principale de simulation

À chaque unité de temps (`time`) :

2.1. Gérer les nouvelles arrivées

- Vérifier si de nouveaux processus arrivent à cet instant (`arrival_time == time`) et les marquer comme "prêts" (`status = READY`)

2.2. Appeler la fonction de sélection (fifo_scheduler)

- La fonction `fifo_scheduler` est appelée pour déterminer quel processus doit s'exécuter

2.3. Logique Non-Préemptive

- Tant que le processus en cours d'exécution n'est pas terminé, il restera celui avec le `arrival_time` le plus bas parmi tous les processus prêts
- Par conséquent, `fifo_scheduler` le re-sélectionnera à chaque tour, assurant qu'il n'est pas préempté par d'autres

2.4. Exécuter le processus sélectionné

- **2.4.1.** Si un processus est sélectionné (`next != -1`) :
  - Exécuter ce processus pendant une unité de temps (décrémenter `remaining_time`)
  - Si le processus termine (`remaining_time == 0`), le marquer comme "terminé" (`status = ZOMBIE`) et incrémenter le compteur global `completed`
- **2.4.2.** Sinon (si `next == -1`) :
  - Le processeur reste inactif (IDLE)

2.5. Avancer le temps

- Incrémenter `time` et répéter la boucle jusqu'à ce que tous les processus soient terminés (`completed == n`)

Étape 3 : Générer les statistiques finales

À la fin de la simulation, utiliser l'historique d'exécution (notamment `end_time` pour chaque processus) pour calculer et afficher :

- Le tableau de Gantt
- Le temps de fin
- Le temps d'attente : `end_time - arrival_time - exec_time`
- Le temps d'attente moyen

Avantages et Inconvénients

Aspect	Évaluation
✅ **Très simple à implémenter**	Parfait pour comprendre le concept
✅ **Zéro préemption**	Pas d'overhead context switch
✅ **Déterministe**	Toujours même résultat
✅ **Bon pour batch**	Tâches longues acceptées
❌ **Très injuste**	Processus court doit attendre les longs

Aspect	Évaluation
❌ **Temps d'attente élevé**	Mauvais pour interactif
❌ **Convoy effect**	Un processus long bloque tout le système

Cas d'Usage Réel

Linux/Unix : Utilisé pour batch jobs, scripts de maintenance (quand démarrage en background via cron).

3.2 Priority Preemptive

Principe

À chaque instant, le processus le **plus prioritaire préempte immédiatement** tout processus en cours d'exécution.

⚠️ **Convention de Priorité** :

- **Mode Ascending (petite valeur = haute priorité)** — convention Unix.
- **Mode Descending (grande valeur = haute priorité)** — optionnel.

Valeur par défaut selon le mode d'exécution :

- **CLI interactif** (`./ordonnanceur`) → **Descending** (valeur + grande = + prioritaire) car `prio_mode = 1` par défaut dans `main.c`.
- **API Next.js** (`/api/schedule`) → **Ascending** (valeur + petite = + prioritaire) car la route passe `--prio-order asc`.

Vous pouvez forcer le mode en CLI avec `--prio-order asc|desc`.

Algorithme de Sélection et Simulation

Étape 0 : Initialiser le mode de priorité

- Récupérer le paramètre `prio_mode` (passé en CLI / API) :
  - `prio_mode = 0` → Ascending (petite valeur = haute prio)
  - `prio_mode = 1` → Descending (grande valeur = haute prio)
- **Défauts réels** :
  - CLI (interactif) : `prio_mode` démarre à **1 (descending)** dans `main.c`
  - API Next.js : la route passe `--prio-order asc` → `prio_mode = 0`

Étape 1 : Définir une fonction de sélection préemptive

Cette fonction permet de choisir le prochain processus à exécuter à chaque unité de temps.

À l'intérieur de cette fonction :

1.1. Ignorer le processus actuellement en cours d'exécution

- Cela permet une préemption immédiate si un meilleur processus devient disponible

1.2. Préparer la recherche du processus le plus prioritaire

- Initialiser un indice "meilleur processus" à -1 (vide)
- Initialiser une valeur extrême selon le mode :
  - Mode Ascending : `best_priority = INT_MAX` (on cherche le minimum)
  - Mode Descending : `best_priority = INT_MIN` (on cherche le maximum)

1.3. Parcourir tous les processus

- **1.3.1.** Sélectionner uniquement ceux qui sont arrivés (`arrival_time <= time`) ET n'ont pas encore terminé (`remaining_time > 0`)
- **1.3.2.** Comparer leur priorité selon le mode :
  - Mode Ascending : si `priority < best_priority` → nouveau meilleur candidat
  - Mode Descending : si `priority > best_priority` → nouveau meilleur candidat
- **1.3.3.** Mettre à jour `best_priority` et l'indice du meilleur processus

1.4. Retourner l'indice du processus le plus prioritaire

- Retourner -1 ("aucun processus prêt") si aucun n'est prêt

Étape 2 : Intégrer cette sélection dans la boucle principale de simulation

À chaque unité de temps :

2.1. Appeler la fonction de sélection préemptive pour déterminer quel processus exécuter

2.2. Si un processus est sélectionné :

- Exécuter ce processus pendant une unité de temps et décrémenter son temps restant

2.3. Sinon :

- Le processeur reste inactif (CPU IDLE)

2.4. Incrémenter le temps et répéter jusqu'à ce que tous les processus soient terminés

Étape 3 : Générer les résultats finaux

À la fin de la simulation, générer le diagramme de Gantt et les statistiques à partir de l'historique d'exécution.

Modes de Priorité

Mode	Valeur Haute Priorité	Exemple	Notes
Ascending (défaut)	Valeur petite	0 > 1 > 5 > 10	✓ Convention Unix standard
Descending (variante)	Valeur grande	10 > 5 > 1 > 0	Utilisable via --prio-order desc

Avantages et Inconvénients

Aspect	Évaluation

Aspect	Évaluation
✅ **Processus critiques prioritaires**	Parfait pour temps réel
✅ **Flexible**	Modes ascendant/descendant
✅ **Simple à implémenter**	Pas de structure complexe
❌ **Processus faible priorité peuvent starver**	Risque famine
❌ **Overhead context switches**	Dégradation performance si trop préemptions
❌ **Pas équitable**	Processus longs = toujours peu servis

Cas d'Usage Réel

Systèmes temps réel dur : Avionique, médical, contrôle industriel (processus critiques d'abord).

3.3 Round Robin (RR)

Principe

Chaque processus reçoit un **quantum** de temps fixe (configurable par l'utilisateur). Si le processus ne se termine pas après avoir consommé son quantum, il retourne en **fin de ready queue** et attend son prochain tour.

Algorithme de Sélection et Simulation

Étape 1 : Initialisation

- Créer une copie des processus pour ne pas modifier l'original
- Pour chaque processus :
  - `remaining_time = exec_time` (temps restant à exécuter)
  - `waiting_time = 0` (temps d'attente cumulé)
  - `end_time = -1` (marqueur de non-terminé)
- Initialiser le temps global à `0`
- Initialiser `completed = 0` (compteur de processus terminés)
- Créer une **file d'attente linéaire** (ready queue) avec indices `head` et `tail` initialisés à 0

Étape 2 : Gestion de la Ready Queue

À chaque itération de la boucle principale :

2.1. Ajouter les nouveaux arrivants à la ready queue

Parcourir tous les processus :

- **Critères d'ajout** :
  - `arrival_time <= time` (processus déjà arrivé)
  - `remaining_time > 0` (processus non terminé)
  - `end_time == -1` (processus pas encore complété)
  - **Processus pas déjà présent dans la queue** (vérification explicite)

- **Mécanisme de détection de duplication** :
  - Pour chaque candidat, parcourir la queue actuelle `[head, tail)`
  - Vérifier si l'indice du processus est déjà dans `ready[j]`
  - Si trouvé → `in_queue = 1`, ne pas ajouter
  - Si non trouvé → ajouter `ready[tail++] = i`

2.2. Vérifier si la queue est vide

- Si `head == tail` (queue vide, aucun processus prêt) :
  - Chercher le prochain `arrival_time` futur parmi les processus non terminés
  - Sauter directement à ce temps : `time = next_arrival`
  - Afficher : `"%4d [IDLE] []"`
  - Continuer à l'itération suivante

Étape 3 : Sélection et Exécution du Processus

3.1. Extraire le processus en tête de file

- `curr = ready[head]` (premier processus dans la queue, index dans le tableau)
- Incrémenter `head++` (retirer de la queue)

3.2. Calculer le temps d'exécution effectif

- `run = min(remaining_time, quantum)`
  - Si `remaining_time < quantum` → exécuter seulement le temps restant
  - Sinon → exécuter exactement le quantum complet

3.3. Afficher l'état actuel

- Format : `"%4d %-8s [ready_queue_content]"`
  - Temps actuel
  - Nom du processus en cours d'exécution
  - Contenu de la ready queue : `"name:remaining_time"` séparés par virgules

3.4. Mettre à jour le waiting_time

- Pour tous les processus **encore en queue** (de `head` à `tail`) :
  - `waiting_time += run` (ils attendent pendant que `curr` s'exécute pendant `run` unités)

3.5. Exécuter le processus

- `remaining_time -= run` (décrémenter le temps restant)
- `time += run` (avancer le temps global de `run` unités)

Étape 4 : Gestion des Nouveaux Arrivants Pendant le Quantum

- Vérifier si de nouveaux processus arrivent pendant l'exécution du quantum
- **Condition** : `arrival_time > (time - run)` ET `arrival_time <= time`
  - C'est-à-dire arrivés entre le début et la fin de ce quantum
- **Critères supplémentaires** :
  - `remaining_time > 0` (non terminé)

    - `end_time == -1` (pas complété)
    - Pas déjà présent dans la queue (même vérification que 2.1)
- Si toutes les conditions sont remplies : ajouter à `ready[tail++]`

Étape 5 : Replacer ou Terminer le Processus

5.1. Si le processus n'est pas terminé (`remaining_time > 0`) :

- Le remettre **en fin de queue** : `ready[tail++] = curr`
- Il attendra son prochain tour (équité garantie)

5.2. Si le processus est terminé (`remaining_time == 0`) :

- Marquer `end_time = time` (temps de fin d'exécution)
- Incrémenter `completed++`
- **Ne pas remettre en queue**

Étape 6 : Répéter jusqu'à Terminaison

- Répéter les étapes 2 à 5 tant que `completed < n`

Étape 7 : Calcul des Statistiques Finales

Pour chaque processus (après terminaison de tous) :

- `finish = end_time` (temps de fin)
- `wait_time = finish - arrival_time - exec_time` (**formule exacte du temps d'attente**)
- Afficher : `"Name Arrival Exec Finish Wait"`
- Calculer `total_wait` (somme de tous les wait_time)
- Calculer `makespan = max(end_time)` (temps total de simulation)
- Afficher `Average Wait Time = total_wait / n`
- Afficher `Makespan`

Choix Optimal du Quantum

Quantum	Impact CPU	Réactivité	Equité	Notes
1-2	Très élevé	Excellente	Parfaite	Overhead inacceptable
4 ✅	Modéré	Bonne	Très bonne	**OPTIMAL TROUVÉ**
8	Bas	Moyenne	Bonne	Bon compromis aussi
16+	Minimal	Mauvaise	Basse	Devient comme FIFO

Avantages et Inconvénients

Aspect	Évaluation
✅ **ÉQUITÉ MAXIMALE** ✅	Aucun processus attend indéfiniment
✅ **Pas de famine**	Tous progressent

Aspect	Évaluation
✅ **Très réactif**	Pas de monopole CPU
✅ **Standard moderne**	Utilisé partout (Linux, Windows)
✅ **Idéal pour interactif**	Bonne expérience utilisateur
❌ Overhead modéré	Context switches nombreux
❌ Quantum à tuner	Pas optimal pour tout workload

Cas d'Usage Réel

Linux : CFS (Completely Fair Scheduler) basé sur ce principe. **Windows** : 20-100ms par processus selon priorité.

3.4 SRT (Shortest Remaining Time First - SRTF)

Principe

Ordonnancement **préemptif** basé sur le **temps restant le plus court**. À chaque unité de temps, le processus avec le `remaining_time` minimum s'exécute. Si un processus plus court arrive, il **préempte immédiatement** le processus en cours.

Théoriquement optimal pour minimiser le temps d'attente moyen.

Algorithme de Sélection et Simulation

Étape 1 : Initialisation

- Créer une copie des processus pour ne pas modifier l'original
- Pour chaque processus :
  - `remaining_time = exec_time` (temps restant à exécuter)
  - `end_time = -1` (marqueur de non-terminé)
- Initialiser le temps global à `0`
- Initialiser `completed = 0` (nombre de processus terminés)

Étape 2 : Boucle Principale de Simulation

À **chaque unité de temps** (`time`) :

2.1. Rechercher le Processus avec le Temps Restant Minimum

Initialiser :

- `best = -1` (indice du meilleur processus)
- `min_rem = 999999` (temps restant minimum trouvé)

Parcourir tous les processus :

- **Critères de sélection** :

    - `arrival_time <= time` (processus déjà arrivé)
    - `remaining_time > 0` (processus non terminé)

- **Logique de sélection** :

    - Si `remaining_time < min_rem` → nouveau meilleur processus
    - Si `remaining_time == min_rem` → départager par `arrival_time` (FIFO pour égalité)
        - Sélectionner celui avec `arrival_time` le plus petit
    - Mettre à jour `min_rem` et `best`

2.2. Gestion de l'État IDLE

- Si `best == -1` (aucun processus prêt) :
    - CPU reste inactif (IDLE)
    - Afficher `[IDLE]`
    - Incrémenter `time` et continuer

Étape 3 : Exécution du Processus Sélectionné

3.1. Affichage de l'état actuel

- Afficher le processus en cours d'exécution
- Afficher la ready queue avec les `remaining_time` de chaque processus en attente

3.2. Exécuter une unité de temps

- `remaining_time--` (décrémenter d'1 unité)
- `time++` (avancer le temps global)

Étape 4 : Vérification de la Terminaison

- Si `remaining_time == 0` (processus vient de se terminer) :
    - Marquer `end_time = time` (temps de fin)
    - Incrémenter `completed`

Étape 5 : Répéter

- Répéter les étapes 2 à 4 tant que `completed < n`

Étape 6 : Calcul des Statistiques Finales

Pour chaque processus :

- `turnaround_time = end_time - arrival_time` (temps de rotation)
- `wait_time = turnaround_time - exec_time` (temps d'attente exact)
- Calculer la moyenne des temps d'attente
- Calculer le makespan (temps total de simulation)

Avantages et Inconvénients

Aspect	Évaluation

Aspect	Évaluation
✅ **OPTIMAL mathématiquement** ✅	Meilleur temps d'attente théorique
✅ Temps attente très bon	Résultats excellents
✅ Peu de préemptions	Comparé à Priority
✅ Utile comme benchmark	Référence de comparaison
❌ **FAMINE des longs processus** ⚠️	Processus long jamais sélectionné
❌ **REQUIERT FUTUR**	exec_time doit être connu à l'avance
❌ Irréaliste en pratique	Pas possible en vrai système d'exploitation
⚠️ Utilisé pour benchmark	Comparer autres algos contre SRT

Cas d'Usage Réel

Aucun en production (requiert avenir). **Théorique uniquement**.

3.5 Multilevel Queue (Statique)

Principe

Cet algorithme gère les processus en respectant une **hiérarchie stricte de priorité**, tout en assurant une équité entre les processus de même rang grâce au tourniquet (**Round-Robin**).

Convention de priorité : Petite valeur = Haute Priorité (ex: 1 > 10, conforme Unix)

Algorithme de Sélection (fonction `select_multilevel`)

Entrées :

- `procs[]` : tableau des processus
- `n` : nombre de processus
- `time` : temps actuel
- `current` : indice du processus actuellement en cours (-1 si aucun)
- `quantum_expired` : booléen indiquant si le quantum est expiré

Étape 1 : Identifier la Priorité MINIMUM des Processus Prêts (convention Unix : petite = haute)

Initialiser :

- `best_prio = INT_MAX` (très grande valeur, on cherche le minimum)
- `processes_ready = 0` (flag indiquant si au moins un processus est prêt)

Parcourir tous les processus :

- **Critères "Processus Prêt"** :
  - `arrival_time <= time` (déjà arrivé)
  - `remaining_time > 0` (pas encore terminé)

- Si processus prêt :
    - Si `priority < best_prio` → mettre à jour `best_prio` (on cherche la PETITE valeur)
    - Marquer `processes_ready = 1`

Si aucun processus prêt (`processes_ready == 0`) → **Retourner -1 (CPU IDLE)**

Étape 2 : Logique Round-Robin pour la Priorité MINIMUM

2.1. Vérifier si le processus courant peut continuer

Si **toutes** les conditions suivantes sont vraies :

- `current != -1` (un processus est en cours)
- `procs[current].remaining_time > 0` (pas encore terminé)
- `procs[current].priority == best_prio` (a toujours la meilleure priorité = même valeur petite)
- `procs[current].arrival_time <= time` (toujours valide)
- `!quantum_expired` (quantum non expiré)

→ **Retourner `current`** (continuer le même processus = stabilité)

2.2. Sinon, chercher le prochain candidat (Round-Robin circulaire)

- Calculer `start_index = (current + 1) % n` (commencer juste après le processus courant)
- Parcourir circulairement tous les processus à partir de `start_index`

Pour `i = 0` à `n-1` :

- `idx = (start_index + i) % n` (parcours circulaire)
- Si processus `idx` est prêt ET a la priorité `best_prio` (même priorité minimum) :
    - **Retourner `idx`** (prochain processus à exécuter)

Si aucun candidat trouvé → **Retourner -1**

Avantages et Inconvénients

Aspect	Évaluation
✅ Différencie types processus	Traitement adapté
✅ Priorités fixes = déterministe	Comportement prévisible
✅ Bon pour systèmes mixtes	Interactif + batch
❌ **FAMINE des basses priorités** ⚠️	Prio 2 peut attendre indéfiniment
❌ Rigide	Pas d'adaptation aux changements
❌ Pas équitable	Basse prio jamais s'exécute si haute prio active

Cas d'Usage Réel

Unix v7, BSD, System V (historique). **Problème** : Famine bien connue.

3.6 Multilevel Feedback Queue (Dynamique) ⭐ MODERNE

Principe

La politique **Multilevel Dynamic** utilise la même fonction de sélection que Multilevel Static (`select_multilevel_dynamic`), mais implémente un **mécanisme d'aging continu** dans la boucle de simulation pour éviter la famine.

Différence clé avec Multilevel Static :

- **Statique** : Les priorités restent fixes toute la simulation
- **Dynamique** : Les priorités augmentent automatiquement pour les processus en attente (anti-famine)

Algorithme de Sélection (fonction `select_multilevel_dynamic`)

Entrées :

- `procs[]` : tableau des processus
- `n` : nombre de processus
- `time` : temps actuel
- `current` : indice du processus actuellement en cours (-1 si aucun)
- `quantum_expired` : booléen indiquant si le quantum est expiré (`quantum_counter >= quantum`)

Logique de sélection :

Étape 1 : Trouver la priorité MINIMUM parmi les processus prêts (convention Unix : petite = haute)

- Initialiser `best_prio = INT_MAX` (valeur très grande)
- Parcourir tous les processus
- Si `arrival_time <= time` ET `remaining_time > 0` :
  - Si `priority < best_prio` → mettre à jour `best_prio` (on cherche la PETITE valeur)
- Si aucun processus prêt → retourner -1 (IDLE)

Étape 2 : Continuer le processus courant si possible

- Si **toutes** les conditions suivantes sont vraies :
  - `current != -1` (un processus est en cours)
  - `procs[current].remaining_time > 0` (pas encore terminé)
  - `procs[current].priority == best_prio` (a toujours la meilleure priorité = même valeur petite)
  - `procs[current].arrival_time <= time` (toujours valide)
  - `!quantum_expired` (quantum non expiré)
- → Retourner `current` (continuer le même processus)

Étape 3 : Sinon, Round-Robin circulaire

- `start_index = (current + 1) % n`
- Parcourir circulairement de `start_index`
- Trouver le premier processus avec `priority == best_prio` (même priorité minimum)
- Retourner son indice (ou -1 si aucun)

Implémentation du Feedback Loop (boucle de simulation)

La logique d'aging est implémentée dans `multilevel_dynamic_simulation()` du fichier `scheduler.c`.

Étape 1 : Initialisation

- `current = -1` (aucun processus en cours)
- `quantum_counter = 0` (compteur de quantum)
- `time = 0`, `finished = 0`

Étape 2 : Boucle principale (tant que `finished < n`)

2.1. Sélection du processus

- Appeler `select_multilevel_dynamic(procs, n, time, current, quantum_counter >= quantum)`
- Si retourne -1 → CPU IDLE, incrémenter `time`, reset `quantum_counter = 0`, `current = -1`

2.2. Affichage de l'état

- Afficher le processus en cours d'exécution
- Afficher la ready queue avec format `"name:remaining_time"`

2.3. Aging dynamique (Anti-Famine) ⭐ CLEF

Pour **tous les processus en attente** (ceux qui NE sont PAS en cours d'exécution) :

- **Critères** : `i != idx` ET `arrival_time <= time` ET `remaining_time > 0`
- **Action** :
  - `priority++` (augmentation de priorité à chaque cycle)
  - `waiting_time++` (compteur d'attente)

Mécanisme anti-famine :

- Un processus en attente voit sa priorité augmenter **continuellement**
- Après suffisamment de cycles, il finira par atteindre la priorité maximum
- Il sera alors sélectionné par la fonction de sélection
- **Garantie** : Aucun processus ne peut attendre indéfiniment

2.4. Exécution du processus sélectionné

- `remaining_time--` (décrémenter d'1 unité)
- `current = idx` (marquer comme processus courant)
- `quantum_counter++` (incrémenter compteur de quantum)

2.5. Vérification de terminaison

- Si `remaining_time == 0` :
  - `end_time = time + 1`
  - `finished++`
  - `quantum_counter = 0` (reset)

2.6. Gestion du quantum expiré

- Si `quantum_counter >= quantum` :
  - `quantum_counter = 0` (reset pour permettre round-robin)
  - Le prochain appel à `select_multilevel_dynamic` aura `quantum_expired = true`
  - Permettra de passer au processus suivant de même priorité

2.7. Avancer le temps

- `time++`

Étape 3 : Statistiques finales

Afficher pour chaque processus :

- Name, Arrival, Exec, Finish, Wait
- **Final_Prio** (priorité finale après aging)

Calculer :

- Average Wait Time
- Makespan

Différence avec Multilevel Static

Aspect	Multilevel Static	Multilevel Dynamic
Priorités	Fixes toute la simulation	Augmentent pendant l'attente
Famine	❌ Possible (basse priorité bloquée)	✅ Impossible (aging garantit progression)
Complexité	Simple	Modérée (aging à gérer)
Équité	Faible	Élevée
Déterminisme	Complet	Réduit (priorités changent)
Usage réel	Systèmes anciens	Systèmes modernes

Avantages et Inconvénients

Conséquence : Aucun processus n'attendra **indéfiniment** → ✅ Anti-famine garanti

Avantages et Inconvénients

Aspect	Évaluation
✅ **Anti-famine**	Aging garantit personne n'attend indéfiniment
✅ **Adaptation dynamique**	S'ajuste au comportement processus
✅ **Équitable**	Meilleur que multilevel statique
✅ **Moderne**	Inspiré Linux CFS réel

Aspect	Évaluation
⚠️ Complexité accrue	Plus de compteurs et conditions
⚠️ Moins déterministe	Feedback rend résultats moins prévisibles

4. Technologies et Architecture

4.1 Choix des Technologies

Technologie	Justification	Bénéfices
Langage C	Requis ; bas niveau ; standard académique	Proximité système, performance
Git + GitHub	Contrôle version ; collaboration ; historique	Traçabilité modifications
Scrum/Agile	Gestion itérative ; sprints ; équipe	Planification adaptable
Trello	Tableau Kanban ; visualisation tâches	Suivi avancement temps réel
Microsoft Teams	Communication équipe ; réunions	Coordination synchrone
VS Code	IDE léger ; plugins C ; compilation intégrée	Productivité développement

4.2 Architecture du Projet

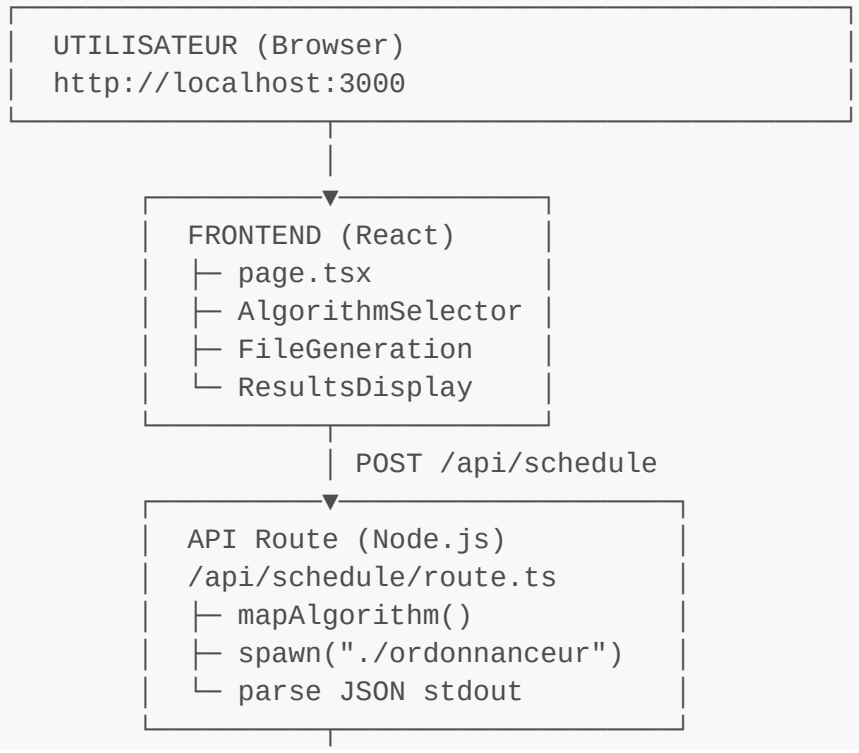
Architecture Hybride : Next.js (Frontend) + C (Backend)

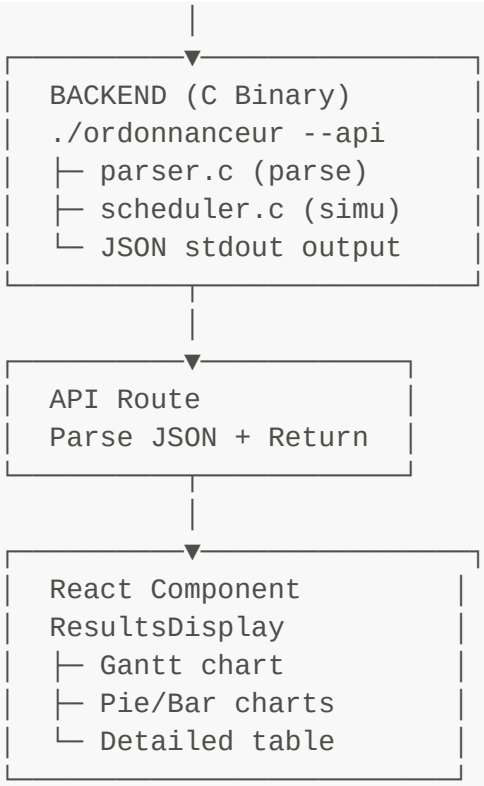
```
Projet-Ordonnancement-Linux-arij-dev/
│
├── FRONTEND (Next.js 16 + React 19)
│   │
│   ├── app/                          # Next.js App Router
│   │   ├── page.tsx                  # Page principale (UI)
│   │   ├── layout.tsx                # Layout racine
│   │   ├── globals.css               # Styles globaux
│   │   └── api/                      # API Routes (Node.js backend)
│   │       ├── schedule/route.ts     # Endpoint: POST /api/schedule
│   │       └── parse-config/route.ts  # Endpoint: POST /api/parse-config
│   │
│   ├── components/                   # React Components
│   │   ├── algorithm-selector.tsx    # Sélecteur algorithme (dropdown)
│   │   ├── file-generation-dialog.tsx # Dialog génération fichier
│   │   ├── results-display.tsx       # Affichage Gantt + Charts + Table
│   │   ├── theme-provider.tsx        # Thème UI (dark/light)
│   │   └── ui/                       # Components Radix UI
(réutilisables)
│   │       ├── button.tsx, card.tsx, dialog.tsx, input.tsx, etc.
│   │
│   ├── lib/                          # Utilitaires Frontend
│   │   ├── types.ts                  # Interfaces TypeScript (Process,
AlgorithmConfig, SchedulingResult)
│   │   └── utils.ts                  # Fonctions utilitaires
```

```
│   │
│   ├── hooks/                          # Hooks React personnalisés
│   │   ├── use-toast.ts                # Notifications
│   │   └── use-mobile.ts               # Détection responsive
│   │
│   ├── styles/                         # Feuilles de styles
│   │
│   ├── public/                         # Assets statiques
│   │
│   ├── tsconfig.json                   # Configuration TypeScript
│   ├── next.config.mjs                 # Configuration Next.js
│   ├── postcss.config.mjs              # Configuration PostCSS
│   ├── package.json                    # Dépendances Node.js
│   └── pnpm-lock.yaml                  # Lock file dépendances
│
├── BACKEND (C + Binaire compilé)
│   │
│   ├── src/                            # Code source C
│   │   ├── main.c                      # Point d'entrée, modes (--api, --
parse-config, --config)
│   │   ├── parser.c                    # Parsing fichier configuration
│   │   ├── scheduler.c                 # Moteur simulation + JSON output
│   │   ├── generate_config.c           # Générateur configs aléatoires
│   │   └── utils.c                     # Utilitaires C (logs, JSON,
affichage)
│   │
│   ├── include/                        # Headers C
│   │   ├── process.h                   # Structure process, constantes
│   │   ├── scheduler.h                 # Prototypes moteur, statistiques
│   │   ├── parser.h                    # Prototypes parsing
│   │   ├── utils.h                     # Prototypes utilitaires
│   │   └── generate_config.h           # Prototypes générateur
│   │
│   ├── policies/                       # Implémentations algorithmes
│   │   ├── fifo.c                      # FIFO
│   │   ├── priority_preemptive.c       # Priority (préemptif)
│   │   ├── roundrobin.c                # Round Robin
│   │   ├── srt.c                       # SRT (Shortest Remaining Time)
│   │   ├── multilevel.c                # Multilevel (statique)
│   │   └── multilevel_dynamic.c        # Multilevel Dynamic (avec aging)
│   │
│   ├── tests/                          # Tests unitaires C
│   │   ├── test_fifo.c, test_priority.c, test_roundrobin.c
│   │   ├── test_multilevel.c, test_multilevel_dynamic.c
│   │   ├── test_parser.c
│   │   └── testfile.txt
│   │
│   ├── build/                          # Fichiers objets (généré par make)
│   │   └── *.o
│   │
│   ├── ordonnanceur                    # Binaire compilé (exécutable C)
│   ├── ordonnanceur.exe                # Binaire Windows
│   ├── Makefile                        # Compilation & tests
│   └── test_*                          # Exécutables tests
```

```
  │
  ├── CONFIGURATION & DONNÉES
  │     │
  │     ├── config/                          # Fichiers configuration
  │     │   ├── sample_config.txt            # Exemple configuration
  │     │   └── config_*.txt                 # Configs générées
  │     │
  │     └── components.json                  # Configuration Shadcn UI
  │
  ├── DOCUMENTATION
  │     │
  │     ├── Documentation.md                 # Documentation technique (cette
doc)
  │     ├── README.md                        # Guide utilisateur + prérequis
  │     ├── INDEX.md                         # Index navigation
  │     ├── COMPLETION_SUMMARY.md            # Résumé changements
  │     ├── FINAL_REPORT.md                  # Rapport validation
  │     ├── CHANGELOG_CONFORMANCE.md         # Changelog détaillé
  │     └── UPDATE_SUMMARY.md                # Résumé mises à jour
  │
  └── CONFIGURATION RACINE
        │
        ├── .gitignore                       # Git ignore
        ├── .next/                           # Cache Next.js
        ├── .vscode/                         # Configuration VS Code
        ├── node_modules/                    # Dépendances npm
        ├── LICENSE                          # MIT License
        ├── package.json                     # Dépendances Node.js + scripts
        └── tsconfig.json                    # TypeScript config
```

Structure Logique par Rôle





4.3 Backend C : Mode Interactif vs Mode API

Mode Interactif (CLI)

Le backend C supporte deux modes opérationnels :

Mode 1: CLI Interactif (Menu)

```
./ordonnanceur
# OU
./ordonnanceur [chemin_fichier_config.txt]
```

Fonctionnement :

- Affiche un menu interactif à l'utilisateur
- Permet de générer automatiquement des processus
- Permet de charger un fichier de configuration existant
- Affiche les résultats en texte sur stdout (Gantt textuel, statistiques)
- **Mode principal pour utilisation en ligne de commande**

Mode API (Programmable)

```
./ordonnanceur --api --config <fichier> --algo <algo> [--quantum <q>] [--
prio-order <asc|desc>]
```

Fonctionnement :

- N'affiche QUE du JSON structuré sur stdout
- Aucune interaction utilisateur
- Conçu pour être appelé par des scripts ou applications
- **Utilisé par les API routes Next.js**

Flags disponibles :

Flag	Valeurs	Obligatoire	Exemple
`--api`	N/A	✓	`--api`
`--config`	Chemin fichier	✓	`--config config/sample.txt`
`--algo`	fifo, priority, roundrobin, srt, multilevel, multilevel_dynamic	✓	`--algo roundrobin`
`--quantum`	Entier > 0	Pour RR et multilevel_dynamic	`--quantum 4`
`--prio-order`	asc, desc	Pour priority	`--prio-order asc`
`--parse-config`	Chemin fichier	Alternatif à --api	`--parse-config config.txt`

Mode parse-config (cas particulier) :

```
./ordonnanceur --parse-config <fichier>
```

- Parse le fichier de configuration
- Retourne UNIQUEMENT un JSON array de processus
- Utilisé pour valider les fichiers avant simulation

4.3 Intégration complète : Frontend Next.js + Backend C

Composants Frontend (React)

1. Page principale (`app/page.tsx`)

- Gestion fichiers (créer processus ou charger fichier `.txt`)
- Sélecteur algorithme avec paramètres dynamiques
- Tableau de processus (preview, "Afficher les détails")
- Bouton "Lancer l'Ordonnancement"

2. AlgorithmSelector (`components/algorithm-selector.tsx`)

- **Options disponibles** : fifo, sjf, static-priority, dynamic-priority, round-robin, multilevel, multilevel-dynamic-priority
- **Paramètres dynamiques** :
  - `quantum` : visible si round-robin ou multilevel-dynamic-priority
  - `priorityOrder` : visible si static-priority ou dynamic-priority
- Validation saisie utilisateur

3. ResultsDisplay (`components/results-display.tsx`)

- **Gantt chart** : timeline interactif (play/pause, zoom)
- **Pie chart** : répartition temps total par processus
- **Bar chart** : temps d'attente vs temps total
- **Tableau détaillé** :
  - Colonnes : id, arrival, execution, waitTime, totalTime, finishTime
  - **Priorité Initiale** : toujours visible
  - **Priorité Finale** : visible **uniquement** pour multilevel_dynamic (après aging)
- **Palette de couleurs** : 20 couleurs distinctes + fallback HSL, déterministe par process ID

APIs Routes Next.js

`POST /api/parse-config`

- Upload fichier `.txt`
- Appelle `ordonnanceur --parse-config <tmpfile>`
- Renvoie array JSON : `[{ id, arrivalTime, executionTime, priority }, ...]`
- Utilisé pour charger un fichier existant

`POST /api/schedule`

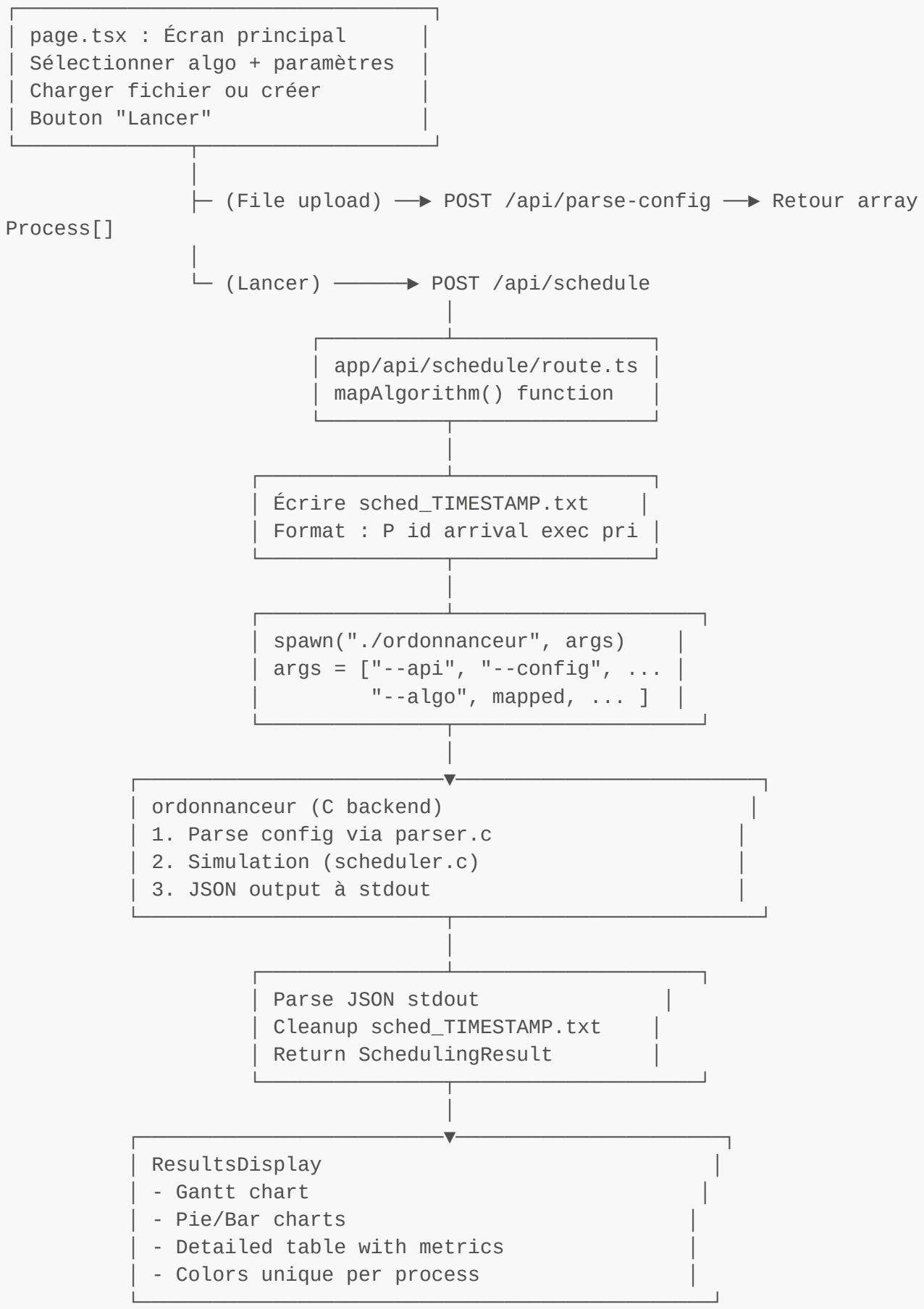
- **Payload** : `{ processes: Process[], config: AlgorithmConfig }`
- **Étapes internes** :
  1. Écrit fichier temp (`sched_${timestamp}.txt`)
  2. Construit CLI args : `["--api", "--config", tmpPath, "--algo", mappedAlgo, ...]`
  3. Appelle `spawn("./ordonnanceur", args)`
  4. Parse stdout JSON
  5. Cleanup fichier temp
- **Réponse** : `SchedulingResult` : `{ algorithm, ganttData[], processStats[], averageWait, makespan }`

Backend C (mode `--api`)

- Lit fichier config via `--config <path>`
- Simule l'algorithme spécifié via `--algo <name>`
- Collecte métriques dans `process_stat` (waitTime, totalTime, finishTime, **finalPriority** pour multilevel_dynamic)
- Génère `ganttData` (timeline des allocations CPU)
- Sortie JSON structurée sur stdout
- Parsée immédiatement par route Next.js → envoyée au client React

4.5 Flow d'Exécution Complet

Frontend → Backend → Frontend :



4.6 Mapping des Algorithmes Frontend → Backend

Frontend Name	Backend Name	Mode	Quantum	Priority Order	Notes
fifo	fifo	Stateless	N/A	N/A	First In First Out
sjf	srt	Stateless	N/A	N/A	Shortest Remaining Time
static-priority	priority	Fixed Mode	N/A	Ascending (API défaut)	✓ Pas d'aging dans le backend
dynamic-priority	priority	Fixed Mode	N/A	Ascending (API défaut)	Même backend `priority` (pas d'aging backend)
round-robin	roundrobin	Preemptive	✓ Required	N/A	Time slice based
multilevel	multilevel	Static	N/A	N/A	Multiple queues, NO migration
multilevel-dynamic-priority	multilevel_dynamic	Dynamic	✓ Optional	N/A	Queues + aging + final_priority

Notes Importantes :

- ✓ `static-priority` et `dynamic-priority` **utilisent le MÊME backend** (`priority`).
- ✓ Par défaut : **API** envoie `--prio-order asc` (petite valeur = haute prio) ; **CLI** sans flag reste en descending (valeur grande = haute prio).
- ✓ La différence entre `static` et `dynamic` est **UI-side uniquement** (visualisation d'aging côté frontend).
- ✓ Le backend Priority n'a PAS d'aging intégré (pas de modification de priorité avec le temps).
- ✓ `multilevel_dynamic` a l'aging vrai **au backend** (modifications réelles des priorités).
- ✓ Seul `multilevel_dynamic` retourne `final_priority` dans les résultats JSON.

Code (`app/api/schedule/route.ts` - mapping réel):

```
// Mode Ascending (par défaut pour priority)
const args = ["--api", "--config", tmpPath, "--algo", "priority", "--prio-order", "asc"]

// Les deux options frontend "static-priority" et "dynamic-priority"
// utilisent EXACTEMENT le même appel backend
// La distinction est uniquement au niveau presentation (frontend)
```

CLI arguments construction:

```
const args = ["--api", "--config", tmpPath, "--algo", mappedAlgo]
if (mappedAlgo === "roundrobin" || mappedAlgo === "multilevel_dynamic") {
  args.push("--quantum", config.quantum || "4")
}
if (mappedAlgo === "priority") {
  args.push("--prio-order", "asc")  // Mode défaut
}
```

Key Points:

- ✓ `static-priority` et `dynamic-priority` → appel identique `priority` au backend
- ✓ `multilevel-dynamic-priority` seul expose colonne **Priorité Finale** (aging visible)
- ✓ Frontend dropdown = 7 options ; Backend = 6 algos (priority compte pour 2)
- ✓ Quantum REQUIS pour RR et multilevel_dynamic
- ✓ JSON API output inclut `finalPriority` pour multilevel_dynamic uniquement

---

5. Déroulement du Développement SCRUM

5.1 Organisation Équipe

Rôle	Responsable(s)
Product Owner	Mme Yosra Najar
Scrum Master	Arij Sebai
Développeuses	Aya Sakroufi, Balkis Hanafi, Hadil Hasni, Wiem Ayari

5.2 Paramètres Scrum

Paramètre	Valeur
Durée totale	5 semaines
Durée sprint	2 semaine (12 jours ouvrables)
Nombre sprints	2 sprints
Réunions	Planning (1h), Daily (15min), Review (1h), Retro (45min)
Total Story Points	~180 SP

5.3 Product Backlog

ID	User Story	Priorité
1	En tant qu'utilisateur, je veux lire un fichier de configuration contenant les processus (nom, arrivée, durée, priorité)	Moyenne
2	En tant que développeur, je veux un Makefile fonctionnel	Haute

ID	User Story	Priorité
3	En tant qu'utilisateur, je veux simuler un ordonnancement FIFO	Moyenne
4	En tant qu'utilisateur, je veux simuler un ordonnancement Round Robin	Haute
5	En tant qu'utilisateur, je veux simuler un ordonnancement à priorité préemptive	Haute
6	En tant qu'utilisateur, je veux voir les résultats sur la console (temps d'attente, temps de retour, Gantt textuel)	Moyenne
7	En tant qu'utilisateur, je veux choisir dynamiquement l'algorithme d'ordonnancement	Moyenne
8	En tant qu'utilisateur, je veux une politique multilevel avec aging	Haute
9	En tant qu'utilisateur, je veux une politique SRT (Shortest Remaining Time)	Haute
10	En tant qu'utilisateur, je veux automatiser la génération d'un fichier de configuration	Moyenne
11	En tant qu'utilisateur, je veux un affichage graphique (diagramme de Gantt)	Haute
12	En tant qu'utilisateur, je veux une interface graphique simple (IHM)	Haute

5.4 Réunion de Lancement (Sprint 0)

Objectif : Préparer le projet et établir les fondations

Tâches essentielles :

1. **Lire et comprendre le sujet**
    - Analyser les spécifications du projet
    - Identifier les cas d'usage
    - Clarifier les ambiguïtés
2. **Identifier les fonctionnalités minimales et avancées**
    - **Minimales** : FIFO, Priority, RR, affichage console
    - **Avancées** : Multilevel, SRT, Gantt graphique, IHM
3. **Créer le dépôt GitHub + choisir la licence (MIT)**
    - Initialiser git local
    - Créer dépôt GitHub
    - Ajouter LICENSE MIT
    - Configurer .gitignore
    - Premier commit

5.5 Sprint Backlog 1

Objectif : Implémenter ordonnanceurs de base et infrastructure

#	Tâche	Charge	Estimation

#	Tâche	Charge	Estimation
1	Conception du fichier de configuration des processus	3 pts	4.5 h
3	Développement de la politique FIFO	5 pts	7.5 h
4	Développement de Round Robin (gestion du quantum)	8 pts	12 h
5	Développement de la politique à priorité préemptive	8 pts	12 h
2	Création du Makefile (build / clean)	4 pts	6 h
6	Affichage textuel des résultats (temps d'attente, temps de retour, Gantt textuel)	3 pts	4.5 h
7	Initialisation du dépôt GitHub	1 pt	1.5 h
10	Ajout d'exemples de tests simples	2 pts	3 h

Total Sprint 1 : **34 points** (**50.5 heures**)

5.6 Sprint Backlog 2

Objectif : Implémenter algorithmes avancés et interface utilisateur

Tâche	Description	Charge	Priorité	Estimation
Multilevel + Aging	Ajouter un ordonnancement multi-files avec mécanisme d'aging	8 pts	Haute	12 h
SRT	Version préemptive de SJF (gestion du temps restant)	8 pts	Haute	12 h
Génération Config	Script/programme produisant un fichier valide automatiquement	4 pts	Moyenne	6 h
IHM + Gantt	IHM basique + génération d'un diagramme de Gantt visuel	10 pts	Moyenne	15 h

Total Sprint 2 : **30 points** (**45 heures**)

5.7 Métriques SCRUM - Sprints 0, 1, 2

Récapitulatif Charges

Sprint	Objectif	Points	Heures	Tâches
Sprint 0	Réunion de lancement	N/A	3	3
Sprint 1	FIFO + Foundation	34	50.5	8
Sprint 2	Algorithmes avancés	30	45	4
TOTAL		**64**	**98.5**	**15**

6. Spécifications Techniques : Point d'Entrée, Parser et Générateur

6.1 Point d'Entrée (main.c) : Modes Interactif et API

Vue d'ensemble des Modes d'Opération

Le backend C (`ordonnanceur`) supporte **3 modes d'opération** :

Mode	Commande	Utilisateur	Output	Cas d'Usage
Interactif	`./ordonnanceur`	Humain	Texte + Gantt textuel	CLI local
Direct File	`./ordonnanceur [fichier]`	Humain	Texte + Gantt textuel	Script shell rapide
API	`./ordonnanceur --api --config ... --algo ...`	Programme/Script	JSON structuré	Routes Next.js
Parse Only	`./ordonnanceur --parse-config [fichier]`	Programme/Script	JSON array	Validation fichiers

Mode 1 : CLI Interactif (Menu Principal)

Étapes du Programme Principal (Mode Interactif)

Étape 0 : Détection du Mode d'Opération

À la première ligne de `main()` :

- **Si aucun argument** (`argc == 1`) → Mode Interactif (menu)
- **Si un argument non-flag** (`argc == 2` et `argv[1][0] != '-'`) → Mode Direct File (fichier passé directement)
- **Si flags détectés** (`--api`, `--parse-config`, `--config`) → Mode API (sortie JSON)

```
if (argc == 2 && argv[1][0] != '-') {
    direct_file_mode = 1;  // Mode: ./ordonnanceur config.txt
    strncpy(filename, argv[1], sizeof(filename) - 1);
}
```

Ensuite, parcourir tous les arguments pour capturer les flags API :

```
for (int i = 1; i < argc; i++) {
    if (strcmp(argv[i], "--api") == 0) { api_mode = 1; }
    else if (strcmp(argv[i], "--parse-config") == 0) { parse_only = 1; }
```

```
    else if (strcmp(argv[i], "--config") == 0) { /* read filename */ }
    else if (strcmp(argv[i], "--algo") == 0) { /* read algo name */ }
    else if (strcmp(argv[i], "--quantum") == 0) { /* read quantum */ }
    else if (strcmp(argv[i], "--prio-order") == 0) { /* read asc|desc */ }
}
```

Étape 1 : Affichage du Menu Interactif

- Afficher le titre : `=== Scheduler Project ===`
- Afficher les deux options :
  - Option 1 : "Generate configuration file automatically (default)"
  - Option 2 : "Use an existing configuration file"
- Demander le choix de l'utilisateur : `Your choice (press ENTER for default):`
- Utiliser `fgets()` pour lire l'entrée (sûr contre débordement de buffer)
- **Validation** :
  - Si entrée vide (juste ENTER) → choix par défaut = 1
  - Si entrée = "1" ou "2" → utiliser ce choix
  - Sinon → avertissement et défaut = 1

Étape 2 : Gestion du Choix 1 (Générer Configuration)

- Récupérer timestamp système :
  - Appeler `time(NULL)` pour obtenir temps actuel
  - Appeler `localtime()` pour convertir en structure `tm`
  - Utiliser `strftime(format, ...)` avec pattern `"%Y%m%d_%H%M%S"` (ex: `20251206_143022`)
- Construire le chemin complet :
  - Format : `"config/sample_config_TIMESTAMP.txt"`
  - Exemple : `config/sample_config_20251206_143022.txt`
  - Utiliser `snprintf()` pour formater de manière sûre
- Appeler `generate_config(filename)` :
  - Passe le chemin au générateur
  - Si retourne 0 → succès
  - Si retourne erreur → afficher message d'erreur et quitter (return 1)

Étape 3 : Gestion du Choix 2 (Charger Fichier Existant)

- Demander : `Enter configuration file name (with path if needed):`
- Lire le nom du fichier avec `scanf("%255s", filename)` :
  - Limite : 255 caractères (sécurité buffer)
  - Accepte chemins avec sous-répertoires (ex: `config/sample_config.txt`)
- **Nettoyage du buffer stdin** :
  - Après `scanf()`, le caractère newline reste dans le buffer

- Boucle de nettoyage : `while ((c = getchar()) != '\n' && c != EOF);`
- Essentiel avant utilisation de `fgets()` ultérieurement

Étape 4 : Affichage du Fichier de Configuration

- Afficher message : `Loading configuration file: <filename>`
- Appeler `display_config_file(filename)` pour afficher le contenu brut du fichier
- Permet à l'utilisateur de vérifier avant parsing

Étape 5 : Parsing et Chargement des Processus

- Allouer un pointeur : `struct process *list = NULL`
- Initialiser compteur : `int n = 0`
- Appeler `parse_config_file(filename, &list, &n)` :
  - Remplit le tableau `list` avec les processus trouvés
  - Remplit `n` avec le nombre de processus chargés
  - Retourne 0 si succès, erreur sinon
- Si erreur (return != 0) :
  - Afficher message d'erreur
  - Quitter (return 1)
- Afficher succès : `✔ N processes loaded.`

Étape 6 : Chargement des Politiques d'Ordonnancement

- Appeler `load_policies()` :
  - Initialise la liste des politiques disponibles
  - Enregistre les fonctions de sélection (FIFO, Priority, RR, SRT, Multilevel, etc.)

Étape 7 : Menu de Sélection de Politique

- Appeler `choose_policy()` :
  - Affiche les politiques disponibles avec numéros
  - Demande à l'utilisateur de choisir
  - Retourne l'indice de la politique choisie

Étape 8 : Lancer la Simulation

- Appeler `run_scheduler(list, n, policy)` :
  - Lance la simulation avec les processus et la politique choisis
  - Orchestre la boucle temps dans `scheduler.c`
  - Affiche les résultats (tableau, statistiques, Gantt)

Étape 9 : Libération Mémoire et Terminaison

- Appeler `free(list)` pour libérer le tableau de processus
- Retourner 0 (succès)

Mode 2 : Direct File Mode (Fichier en Arguments)

Comportement : `./ordonnanceur config/sample_config.txt`

Différence avec Mode Interactif :

- Saute le menu initial
- Charge directement le fichier fourni en argument
- Affiche le contenu du fichier
- Affiche le menu de sélection de politique
- Exécute la simulation et affiche résultats (texte + Gantt)

Avantage : Utile pour scripts shell automatisés sans intervention utilisateur.

Mode 3 : API Mode (Mode Programmable JSON)

Comportement : `./ordonnanceur --api --config <file> --algo <algo> [--quantum <q>] [--prio-order <asc|desc>]`

Ou en cas de Parse Only : `./ordonnanceur --parse-config <file>`

Différence avec Modes Interactifs :

- Aucune interaction utilisateur
- Sortie **UNIQUEMENT** JSON structuré sur stdout
- Pas d'affichage de menu, pas de Gantt textuel
- Erreurs en JSON format (pour faciliter parsing)
- Conçu pour appels programmatiques

Étapes Internes (Mode API) :

1. **Parsing des flags** (déjà fait à Étape 0)
2. **Vérification si parse_only** :
   - Si oui : parser le fichier → retourner JSON array des processus → terminer
   - Si non : continuer au scheduler
3. **Vérification si api_mode** :
   - Si non : mode interactif classique
   - Si oui : continuer mode API
4. **Chargement de la configuration** :
   - Appeler `parse_config_file(config_path, &list, &n)`
   - Si erreur : `printf("{\"error\":\"Failed to parse config\"}\n")`
5. **Création de la structure d'options** :

```
struct scheduler_options opts = {
    .algorithm = algo,        // "fifo", "priority", "roundrobin",
etc.
    .quantum = quantum,       // pour RR et multilevel_dynamic
    .prio_mode = prio_mode    // 0 = asc, 1 = desc
};
```

6. **Appel au scheduler mode API** :
   - Appeler `run_scheduler_api(list, n, &opts, &result)`
   - Cette fonction remplit `result` avec :
     - `gantt_segment[]` : allocation CPU par temps
     - `process_stat[]` : statistiques par processus
     - `average_wait`, `makespan` : métriques globales
7. **Sortie JSON** :
   - Appeler `print_json_result(&result)`
   - Affiche JSON structuré sur stdout
   - API route Next.js parse ce JSON

Exemple de sortie JSON (Mode API) :

```
{
  "algorithm": "roundrobin",
  "ganttData": [
    { "process": "P1", "start": 0, "end": 4 },
    { "process": "P2", "start": 4, "end": 8 },
    { "process": "P1", "start": 8, "end": 10 }
  ],
  "processStats": [
    { "id": "P1", "arrivalTime": 0, "executionTime": 10, "finishTime": 10,
"waitTime": 0 },
    { "id": "P2", "arrivalTime": 2, "executionTime": 6, "finishTime": 8,
"waitTime": 0 }
  ],
  "averageWait": 0,
  "makespan": 10
}
```

6.2 Format Fichier Configuration

Syntaxe Générale

Chaque ligne représente soit :

- Un **processus valide** : 4 champs séparés par espaces ou tabulations
- Une **ligne vide** : ignorée
- Un **commentaire** : ignoré

Ordre des Champs (Obligatoire)

Position	Champ	Type	Contraintes
1	`name`	Chaîne	Sans espaces (ex: P1, processA)
2	`arrival_time`	Entier	>= 0

Position	Champ	Type	Contraintes
3	`exec_time`	Entier	> 0 (strictement positif)
4	`priority`	Entier	Intervalle selon contexte

Règles Commentaires

- **Commentaire entier** : Ligne commençant par `#` → ignorée complètement
- **Commentaire en fin de ligne** : Tout ce qui suit `#` → ignoré

Exemple Complet

```
# Configuration exemple processus
P1 0 250 3       # Processus 1, arrive t=0, durée 250ms, prio 3
P2 10 100 1      # Processus 2, arrive t=10, durée 100ms, prio 1
P3 20 150 0      # Processus 3, arrive t=20, durée 150ms, prio 0

# Ligne vide ci-dessus = ignorée

P4 20 50 5       # Valide
# P5 25 75 2     # Commentaire entier → ignoré complètement
P6 30 200 2 # Commentaire fin ligne → ignoré

P7  40  100 1   # Tabulations acceptées
```

Règles de Parsing Détaillées

Cas	Détection	Action	Exemple
Ligne vide	Zéro caractères non-blanche	Ignorer	`\n` ou
Commentaire	1er caractère non-blanc = `#`	Ignorer	`# Configuration...`
Processus valide	4 tokens + conversions OK + valeurs acceptables	Parser struct	`P1 0 250 3`
Moins de 4 tokens	Split retourne < 4 éléments	Warning + ignorer	`P1 0 250` (3 champs)
Champ non-numérique	`atoi()` échoue sur token[i]	Warning + ignorer	`P1 zero 250 3`
arrival_time < 0	`atoi(token[1]) < 0`	**Erreur fatale**	`P1 -5 250 3`
exec_time <= 0	`atoi(token[2]) <= 0`	**Erreur fatale**	`P1 0 0 3` ou `P1 0 -10 3`
priority hors intervalle	`atoi(token[3])` hors [0, MAX]	Warning (mode strict) ou ignorer	`P1 0 250 99` (si MAX=10)

Algorithme de Parsing Détaillé

Étape 1 : Initialisation

- Ouvrir le fichier de configuration en mode lecture
- Allouer un tableau dynamique de processus (capacité initiale : 16 éléments)
- Initialiser compteur de processus à 0
- Initialiser numéro de ligne à 0

Étape 2 : Lecture ligne par ligne

Pour chaque ligne du fichier :

2.1. Pré-traitement de la ligne

- Supprimer le caractère de fin de ligne `\n` si présent
- Identifier le premier caractère non-blanc
- Si la ligne est entièrement vide → ignorer et passer à la suivante
- Si le premier caractère est `#` → ligne commentaire complète, ignorer

2.2. Traitement des commentaires en fin de ligne

- Chercher le caractère `#` dans la ligne
- Si trouvé : tronquer la ligne à cette position (tout après `#` est ignoré)
- Résultat : seule la partie avant `#` est conservée

2.3. Tokenisation (découpage)

- Utiliser la fonction de tokenisation pour découper la ligne selon délimiteurs : espace et tabulation
- Extraire jusqu'à 4 tokens maximum :
  - Token 0 : `name` (chaîne de caractères)
  - Token 1 : `arrival_time` (chaîne à convertir en entier)
  - Token 2 : `exec_time` (chaîne à convertir en entier)
  - Token 3 : `priority` (chaîne à convertir en entier)
- Si moins de 4 tokens trouvés → ligne mal formée, ignorer

2.4. Conversion et validation numériques

Pour chaque champ numérique :

- Utiliser `strtol()` pour convertir le token en entier long
- Vérifier que la conversion a réussi (pointeur de fin modifié)
- Appliquer les règles de validation :
  - `arrival_time` : doit être ≥ 0 (sinon ignorer la ligne)
  - `exec_time` : doit être > 0 (sinon ignorer la ligne)
  - `priority` : toute valeur entière acceptée

2.5. Expansion dynamique du tableau

- Si le tableau est plein (nombre de processus ≥ capacité) :
  - Doubler la capacité du tableau
  - Réallouer la mémoire avec `realloc()`

- Vérifier succès allocation (sinon libérer et retourner erreur)

2.6. Ajout du processus au tableau

- Copier le nom dans `processes[n].name` (limite : NAME_LEN caractères)
- Assigner `arrival_time`, `exec_time`, `priority`
- Initialiser `remaining_time = exec_time`
- Initialiser `status = 0` (READY)
- Initialiser `end_time = 0`, `waiting_time = 0`
- Incrémenter le compteur de processus

Étape 3 : Finalisation

3.1. Fermeture du fichier

- Fermer le descripteur de fichier

3.2. Vérification résultat

- Si aucun processus valide trouvé (count = 0) :
  - Libérer le tableau
  - Retourner succès avec 0 éléments

3.3. Optimisation mémoire (optionnel)

- Réduire la taille allouée à la taille exacte utilisée
- Utiliser `realloc()` pour ajuster à `count * sizeof(struct process)`

Étape 4 : Tri par temps d'arrivée

- Appeler `qsort()` avec comparateur `cmp_arrival()`
- Comparateur : retourne `pa->arrival_time - pb->arrival_time`
- Résultat : tableau trié par ordre croissant d'arrivée

Étape 5 : Retour

- Assigner le pointeur du tableau à `*out`
- Assigner le nombre de processus à `*out_n`
- Retourner 0 (succès)

6.3 Générateur Configuration Automatique

But

Créer automatiquement un fichier de configuration contenant des processus générés aléatoirement, sans intervention manuelle.

Paramètres d'Entrée

Le générateur accepte **5 paramètres** :

Paramètre	Type	Explication	Exemple

Paramètre	Type	Explication	Exemple
`nb_processes`	Entier	Nombre de processus à générer	20
`max_arrival_time`	Entier	Temps d'arrivée maximal (min=0)	100
`min_priority`	Entier	Priorité minimale	0
`max_priority`	Entier	Priorité maximale	5
`max_exec_time`	Entier	Durée d'exécution maximale (min=1)	500

Algorithme de Génération Automatique

Étape 1 : Initialisation du générateur aléatoire

- Appeler `srand(time(NULL))` pour initialiser le seed
- Utiliser le timestamp actuel comme source d'aléatoire
- Garantit génération différente à chaque exécution

Étape 2 : Collecte des paramètres utilisateur

Demander interactivement à l'utilisateur :

- **Nombre de processus** : `nb_processes` (doit être > 0)
- **Temps d'arrivée maximal** : `max_arrival_time` (doit être ≥ 0)
- **Priorité minimale** : `min_priority` (toute valeur entière)
- **Priorité maximale** : `max_priority` (doit être ≥ min_priority)
- **Temps d'exécution maximal** : `max_exec_time` (doit être > 0)

Validation : vérifier que les contraintes sont respectées, sinon retourner erreur

Étape 3 : Création du fichier de sortie

- Ouvrir le fichier en mode écriture (`"w"`)
- Nom du fichier : passé en paramètre ou généré avec timestamp
- Format timestamp : `sample_config_YYYYMMDD_HHMMSS.txt`
- Si échec ouverture : afficher erreur et retourner -1

Étape 4 : Écriture de l'en-tête

- Ligne 1 : `# Auto-generated file – N random processes`
- Ligne 2 : `# Params: arrival[0-MAX], priority[MIN-MAX], exec[1-MAX]`
- Ligne 3 : ligne vide pour séparation

Étape 5 : Génération des processus

Pour chaque processus i de 1 à nb_processes :

5.1. Génération du nom

- Format : `P` suivi du numéro séquentiel
- Exemple : `P1`, `P2`, `P3`, ..., `P20`

- Utiliser `snprintf()` pour formater

5.2. Génération temps d'arrivée

- Formule : `arrival_time = rand() % (max_arrival_time + 1)`
- Plage résultante : **[0, max_arrival_time]** (inclusif)
- Distribution : uniforme

5.3. Génération temps d'exécution

- Formule : `exec_time = 1 + rand() % max_exec_time`
- Plage résultante : **[1, max_exec_time]** (jamais 0)
- Distribution : uniforme
- Garantie : processus toujours exécutables

5.4. Génération priorité

- Formule : `priority = min_priority + rand() % (max_priority - min_priority + 1)`
- Plage résultante : **[min_priority, max_priority]** (inclusif)
- Distribution : uniforme
- Exemple : si min=0 et max=5 → priorités possibles : 0, 1, 2, 3, 4, 5

5.5. Écriture de la ligne

- Format : `NAME ARRIVAL EXEC PRIORITY\n`
- Exemple : `P1 15 250 3\n`
- Utiliser `fprintf()` pour écrire dans le fichier

Étape 6 : Finalisation

- Fermer le fichier avec `fclose()`
- Afficher message de confirmation : `✔ File 'filename' generated successfully.`
- Afficher le chemin absolu ou relatif du fichier créé
- Retourner 0 (succès)

Étape 7 : Vérification automatique

- Le fichier généré est **toujours valide** (respect des règles)
- Toutes les lignes ont exactement 4 champs
- Tous les `exec_time` sont > 0
- Tous les `arrival_time` sont ≥ 0
- Pas besoin de validation manuelle

Fichier Résultat

- **Nommage** : `sample_config_TIMESTAMP.txt`
  - Format timestamp : `YYYYMMDD_HHMMSS` (ex: `sample_config_20251206_143052.txt`)
- **Validité** : Fichier généré est automatiquement **valide** (respecte toutes les règles)
- **Sortie** : Affichage confirmation + chemin fichier

6.4 Fichiers Headers et Structures Partagées

But

Documenter les fichiers headers (`.h`) qui définnisent les structures et prototypes partagés entre les modules C.

`include/process.h`

Définit la **structure centrale** représentant un processus.

```c
#ifndef PROCESS_H
#define PROCESS_H

#define NAME_LEN 64          // Longueur max du nom de processus
#define READY 0              // État : processus prêt
#define RUNNING 1            // État : processus en cours
#define BLOCKED 2            // État : processus bloqué
#define ZOMBIE 3             // État : processus terminé

struct process {
    char name[NAME_LEN];     // Nom unique du processus (ex: "P1")
    int arrival_time;        // Temps d'arrivée >= 0
    int exec_time;           // Durée totale d'exécution, > 0 (immuable)
    int priority;            // Priorité (convention Unix: petite = haute)
    int remaining_time;      // Temps restant à exécuter (modifiable)
    int waiting_time;        // Temps total d'attente cumulé
    int status;              // État actuel (READY/RUNNING/BLOCKED/ZOMBIE)
    int end_time;            // Temps de fin d'exécution (pour métriques)
    int wait_time;           // Compteur temporaire pour aging (Multilevel)
};

#endif
```

Utilisation : Inclus par `scheduler.h`, `parser.h`, et tous les fichiers de politiques.

`include/scheduler.h`

Définit les structures de **résultats de simulation** et les prototypes de fonctions de scheduling.

```c
#ifndef SCHEDULER_H
#define SCHEDULER_H

#define MAX_SEGMENTS 2048    // Nombre max de segments Gantt

struct gantt_segment {
    char process[NAME_LEN];  // Nom du processus exécuté
    int start;               // Temps de début
    int end;                 // Temps de fin
};
```

```c
struct process_stat {
    char id[NAME_LEN];       // ID du processus
    int arrival_time;        // Temps d'arrivée
    int exec_time;           // Durée d'exécution totale
    int finish_time;         // Temps de fin réel
    int wait_time;           // Temps d'attente calculé
    int priority;            // Priorité initiale
    int final_priority;      // Priorité finale (Multilevel Dynamic
uniquement)
};

struct simulation_result {
    char algorithm[64];                          // Nom algo exécuté
    struct gantt_segment segments[MAX_SEGMENTS];  // Timeline CPU
    int segment_count;                           // Nombre de segments
    struct process_stat stats[256];              // Stats par processus
    int stat_count;                              // Nombre de processus
    double average_wait;                         // Temps d'attente moyen
    int makespan;                                // Temps total simulation
};

struct scheduler_options {
    const char *algorithm;   // Nom algo: "fifo", "priority", "roundrobin",
"srt", "multilevel", "multilevel_dynamic"
    int quantum;             // Quantum pour RR et multilevel_dynamic
    int prio_mode;           // 0=ascending (Unix, défaut), 1=descending
};

// Déclarations de fonctions publiques
void load_policies();                            // Initialise les
politiques
int choose_policy();                             // Menu sélection
politique
void run_scheduler(struct process *, int, int);  // Mode interactif
int run_scheduler_api(struct process *, int, const struct scheduler_options
*, struct simulation_result *);
void print_json_result(const struct simulation_result *); // Output JSON

// Prototypes des simulations pour chaque algorithme
void fifo_simulation(struct process *, int);
void priority_simulation(struct process *, int, int);    // int = prio_mode
void rr_simulation(struct process *, int);               // Quantum dans
struct process
void multilevel_simulation(struct process *, int, int);  // int = quantum
void multilevel_dynamic_simulation(struct process *, int, int); // int =
quantum
void srt_simulation(struct process *, int);

#endif
```

Utilisation : Inclus par `src/scheduler.c` (orchestrateur) et `src/main.c` (point d'entrée).

include/parser.h

Définit les prototypes de **parsing de fichiers** de configuration.

```c
#ifndef PARSER_H
#define PARSER_H

#include "process.h"

// Parsing principal
int parse_config_file(const char *filename, struct process **out, int
*out_n);

// Utilitaires
void display_config_file(const char *filename);  // Affiche contenu brut
fichier
int validate_process(struct process *p);         // Valide structure
processus

#endif
```

Utilisé par : `src/main.c` et `app/api/parse-config/route.ts`.

include/utils.h

Définit les fonctions **utilitaires** (affichage, JSON, tableaux, etc.).

```c
#ifndef UTILS_H
#define UTILS_H

#include "scheduler.h"

// Affichage Gantt textuel
void print_gantt(struct gantt_segment *, int);
void print_statistics(struct process_stat *, int, double, int);

// Sérialisation JSON (mode API)
void print_json_result(const struct simulation_result *);

// Utilitaires mémoire
void free_processes(struct process *);

#endif
```

include/generate_config.h

Définit le générateur de **configurations aléatoires**.

```c
#ifndef GENERATE_CONFIG_H
#define GENERATE_CONFIG_H

int generate_config(const char *filename);  // filename peut inclure
chemins + timestamp

#endif
```

Dépendances Entre Headers

```
process.h
    ↓
scheduler.h ← includes process.h
parser.h    ← includes process.h
utils.h     ← includes scheduler.h
generate_config.h
    ↓
Toutes les politiques (*.c) incluent scheduler.h
```

Convention de Naming

- **Structures** : `struct nom_descriptif` (ex: `struct process`, `struct gantt_segment`)
- **Constantes** : `UPPER_CASE` (ex: `READY`, `NAME_LEN`, `MAX_SEGMENTS`)
- **Fonctions** : `snake_case` (ex: `parse_config_file`, `print_gantt`, `fifo_simulation`)
- **Fichiers** : `snake_case.h` ou `.c` (ex: `priority_preemptive.c`, `utils.c`)

7. Makefile et Compilation

7.1 Objectif du Makefile

Le Makefile permet de :

- **Compiler automatiquement** l'exécutable `ordonnanceur` à partir des fichiers source
- **Générer les fichiers objets** (.o) dans `build/`
- **Faciliter le nettoyage** du projet (remove objets, exécutables)
- **Éviter la compilation manuelle** (pas besoin de taper gcc à chaque fois)

7.2 Variables Principales

Variable	Signification	Valeur	Utilité
TARGET	Exécutable final	`ordonnanceur`	Nom du binaire
SRC_DIR	Répertoire source	`src`	Où chercher .c principaux
INC_DIR	Répertoire headers	`include`	Où chercher .h

Variable	Signification	Valeur	Utilité
POL_DIR	Répertoire politiques	`policies`	Où chercher algorithmes .c
BUILD_DIR	Répertoire objets	`build`	Où générer .o
SRC	Liste source	`$(wildcard src/*.c)`	Tous .c dans src/
POLICIES	Liste politiques	`$(wildcard policies/*.c)`	Tous .c dans policies/
OBJ	Liste objets	Substitution → build/*.o	Fichiers intermédiaires
CC	Compilateur C	`gcc`	Exécutable compilation
CFLAGS	Options compilation	`-Wall -Wextra -std=c11 -I$(INC_DIR)`	Warnings + includes

7.3 Règles Principales

Règle par défaut : `all`

```
all: build $(TARGET)
```

Dépendances :

1. Crée le répertoire `build/` (si nécessaire)
2. Construit l'exécutable `ordonnanceur`

Usage :

```
make              # Compilation complète
make all          # Équivalent
```

Construction de l'exécutable

```
$(TARGET): $(OBJ)
    $(CC) -o $@ $^ $(CFLAGS)
```

- **$@** : Cible (ordonnanceur)
- **$^** : Toutes dépendances (fichiers .o)
- **Action** : Linker tous les objets en un exécutable unique

Compilation fichiers source

```
$(BUILD_DIR)/%.o: $(SRC_DIR)/%.c
    $(CC) $(CFLAGS) -c $< -o $@
```

- **%.o** : Règle pattern pour n'importe quel fichier objet
- **$<** : Fichier source correspondant
- **-c** : Compiler uniquement (pas de linking)
- **-o $@** : Output fichier objet
- **Note** : -I$(INC_DIR) déjà inclus dans CFLAGS

Compilation fichiers politiques

```
$(BUILD_DIR)/%.o: $(POL_DIR)/%.c
    $(CC) $(CFLAGS) -c $< -o $@
```

Identique à la précédente, mais pour fichiers dans `policies/`.

Création du dossier build/

```
build:
    @mkdir -p $(BUILD_DIR)
```

- **-p** : Crée le dossier uniquement si inexistant, pas d'erreur
- **@** : Supprime affichage de la commande dans terminal

Nettoyage standard : `clean`

```
clean:
    rm -rf $(BUILD_DIR) $(TARGET)
```

Supprime :

- Répertoire `build/` et tous fichiers .o
- Exécutable `ordonnanceur`

Usage :

```
make clean        # Préparer recompilation propre
```

Nettoyage complet : `mrproper`

```
mrproper: clean
```

Action : Appelle simplement `clean` (actuellement identique)

Usage :

```
make mrproper     # Nettoyage complet
```

7.4 Déclaration PHONY

```
.PHONY: all clean mrproper build
```

Pourquoi : Indique à `make` que ce ne sont pas des fichiers, mais des commandes. Évite conflits si un fichier s'appelle "clean".

7.5 Flags Compiler Expliqués

Flag	Signification	Utilité	Exemple
-Wall	"Warn All"	Affiche TOUS les warnings	Captures variables inutilisées
-Wextra	Warnings supplémentaires	Rigueur accrue	Détecte plus de problèmes
-std=c11	Standard C11	Assure compatibilité	Types bool, uint64_t, etc
-I(dir)	Include directory	Ajoute répertoire headers	`-I$(INC_DIR)` cherche dans include/

Note : Le Makefile actuel n'utilise pas `-g` (debug) ni `-O2` (optimisation) par défaut.

7.6 Principes et Avantages

Principe	Avantage
Automatisation	Plus besoin de gcc manuel à chaque fois
Modularité	Ajouter src/*.c ou policies/*.c sans modifier Makefile
Compilation incrémentale	Recompile uniquement ce qui a changé
Répertoire dédié	build/ = propre, tous les .o centralisés
Nettoyage facile	make clean = repartir à zéro
Portabilité	Variables faciles à modifier pour autre compilateur

7.7 Utilisation Pratique

```
# Compilation complète
make
# Nettoyer objets uniquement (récompile changé)
make clean
# Nettoyage total (repartir zéro + config)
make mrproper
# Voir étapes compilation
make -d                 # Mode debug
```

---

8. Conclusion

8.1 Résultats Obtenus

Ce projet a permis de réaliser un **simulateur complet d'ordonnancement de processus** avec les résultats suivants :

Objectifs Techniques Atteints

✅ **6 algorithmes d'ordonnancement implémentés et fonctionnels**

✅ **Architecture modulaire et extensible**

✅ **Générateur automatique de configurations**

✅ **Parser robuste**

✅ **Compilation automatisée**