

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 supérieur d'informatique à Ariana
1ING3**

Table des Matières

1. Introduction [Page 4](#)

2. Choix des Structures de Données [Page 4](#)

- 2.1 Structure **process** : Le Cœur du Système
- 2.2 Représentation des Données : Tableau Dynamique
- 2.3 Représentation Implicite de la Ready Queue
- 2.4 État des Processus : Machine d'État

3. Choix des Algorithmes d'Ordonnancement [Page 6](#)

- 3.1 FIFO (First-In First-Out)
- 3.2 Priority Preemptive
- 3.3 Round Robin (RR)
- 3.4 SRT (Shortest Remaining Time First)
- 3.5 Multilevel Queue (Statique)
- 3.6 Multilevel Feedback Queue (Dynamique)
- 3.7 Tableau Comparatif des Algorithmes

4. Technologies et Architecture [Page 17](#)

- 4.1 Choix des Technologies
- 4.2 Architecture du Projet
- 4.3 Backend C : Mode Interactif vs Mode API
- 4.4 Intégration complète : Frontend Next.js + Backend C
- 4.5 Flow d'Exécution Complet
- 4.6 Mapping des Algorithmes Frontend → Backend

5. Déroulement du Développement SCRUM [Page 19](#)

- 5.1 Organisation Équipe
- 5.2 Paramètres Scrum
- 5.3 Product Backlog
- 5.4 Réunion de Lancement (Sprint 0)
- 5.5 Sprint Backlog 1
- 5.6 Sprint Backlog 2
- 5.7 Métriques SCRUM

6. Spécifications Techniques [Page 22](#)

- 6.1 Point d'Entrée (main.c) : Modes Interactif et API
- 6.2 Format Fichier Configuration
- 6.3 Générateur Configuration Automatique
- 6.4 Fichiers Headers et Structures Partagées

7. Makefile et Compilation [Page 27](#)

- 7.1 Objectif du Makefile

- 7.2 Variables Principales
- 7.3 Règles Principales
- 7.4 Déclaration PHONY
- 7.5 Flags Compiler Expliqués
- 7.6 Principes et Avantages
- 7.7 Utilisation Pratique

8. Conclusion Page 31

1. Introduction

Objectif du Projet

Ce projet est un **simulateur d'ordonnancement de processus sous Linux** avec une architecture hybride moderne : **Frontend Next.js 16/React 19 + Backend C**.

Capacités principales :

- **✓ 6 algorithmes d'ordonnancement** : FIFO, Round-Robin, Priorité préemptive, SRT, Multilevel statique, Multilevel Dynamic (anti-famine)
- **✓ Interface Web interactive** : sélection algorithme, paramètres dynamiques (quantum, ordre priorité), visualisations temps réel
- **✓ Backend C performant** : moteur de simulation compilé, modes CLI interactif et API JSON
- **✓ Visualisations riches** : Gantt chart interactif (play/pause/zoom), graphiques (pie/bar charts), tableau détaillé avec métriques
- **✓ Générateur automatique** : création fichiers configuration aléatoires
- **✓ Métriques complètes** : temps d'attente, temps total, finish time, makespan, CPU utilization
- **✓ Architecture modulaire** : ajout nouvel algorithme = 1 fichier dans `policies/`, sans modifier `scheduler.c`

Technologies : Next.js 16, React 19, TypeScript, Tailwind CSS, Radix UI, Recharts (frontend) + C11/GCC, Make (backend)

Dépôt Git : github.com/arijsebai/Projet-Ordonnancement-Linux (branch: `dev`)

2. Choix des Structures de Données

2.1 Justification des Structures Principales

Structure `process` : Le Cœur du Système

```
#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)
    };

```

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
✗ 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)**
- **Mode Descending (grande valeur = haute priorité)**

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.

Avantages et Inconvénients

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 qui arrive exactement à cet instant)
- `remaining_time > 0` (processus non terminé)

- **Mécanisme d'ajout :**

- Si les critères sont remplis → ajouter `ready[tail++] = i`
- **⚠ Note d'implémentation :** Le code actuel n'implémente pas de vérification de duplication explicite, ce qui peut théoriquement causer des ajouts multiples si la logique de gestion de queue n'est pas rigoureuse

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. Calcul du waiting_time

- **⚠ Note d'implémentation :** Le temps d'attente est calculé à la fin de la simulation avec la formule :
 - `wait_time = finish - arrival_time - exec_time`
- Cette approche utilise le calcul final plutôt qu'une accumulation incrémentale pendant l'exécution

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	Équité	Notes
1-2	Très élevé	Excellente	Parfaite	Overhead inacceptable
4 <input checked="" type="checkbox"/>	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
✓ 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.

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]`
 - Incrémente `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--` (décrémente 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)
 - Incrémente `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
✓ Temps attente très bon	Résultats excellents
✓ Peu de préemptions	Comparé à Priority
✗ FAMINE des longs processus !	Processus long jamais sélectionné
✗ Irréaliste en pratique	Pas possible en vrai système d'exploitation

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 : Grande valeur = Haute Priorité (ex: 10 > 1)

⚠ Note : Cette convention est inversée par rapport au standard Unix où petite valeur = haute priorité. Notre implémentation utilise la logique inverse pour simplification.

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 MAXIMUM des Processus Prêts (convention : grande = haute)

Initialiser :

- `best_prio = -1` (très petite valeur, on cherche le maximum)
- `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 GRANDE 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 grande)
- `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 maximum) :
 - **Retourner idx** (prochain processus à exécuter)

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

Avantages et Inconvénients

Aspect	Évaluation
✓ 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

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 MAXIMUM parmi les processus prêts (convention : grande = haute)

- Initialiser `best_prio = -1` (valeur très petite)
- Parcourir tous les processus
- Si `arrival_time <= time` ET `remaining_time > 0` :
 - Si `priority > best_prio` → mettre à jour `best_prio` (on cherche la GRANDE 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 grande)
 - `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 maximum)
- 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

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

4. Technologies et Architecture

4.1 Stack Technologique Complet

A. Frontend (Web UI Moderne)

Technologie	Version	Rôle	Justification
Next.js	16.0.3	Framework React SSR + routing	Production-ready, performance optimale
React	19.2.0	UI library composants	Modern hooks, state management
TypeScript	^5	Typage static	Sécurité types, refactoring facile
Tailwind CSS	^4.1.9	Utility-first CSS	Styling rapide, responsive design
Radix UI	~1.x	Composants accessibles	Boutons, dialogs, tabs, forms
Recharts	latest	Visualisation données	Gantt, pie/bar charts interactifs

Technologie	Version	Rôle	Justification
Sonner	^1.7.4	Toast notifications	Feedback utilisateur
next-themes	^0.4.6	Dark/Light theme	Thème UI persistant
zod	3.25.76	Validation schémas	Validation configs uploads
React Hook Form	^7.60.0	Gestion formulaires	Forms performantes

B. Backend (Moteur Simulation C)

Technologie	Version	Rôle	Justification
C	C11	Langage implémentation	Requis, bas niveau, performance
GCC	9.4.0	Compilateur	Standard Linux, optimisé
Make	4.2.1	Build automation	Compilation incrémentale
POSIX	Standard	API système	Portabilité Linux/Unix

C. Build & Package Management (Frontend)

Technologie	Version	Rôle	Justification
pnpm	10.24.0	Package manager	Plus rapide/efficace que npm
Node.js	20.19.6	Runtime JavaScript	Exécution Next.js, APIs
npm/corepack	10.8.2	Package install	Gestion dépendances
Turbopack	Intégré	Bundler Next.js	Compilation ultra-rapide
PostCSS	^8.5	CSS processing	Tailwind compilation

D. Tooling & Développement

Technologie	Version	Rôle	Justification
VS Code	Latest	IDE principal	Léger, plugins C/TypeScript/Git
Git	2.x	Contrôle version	Collaboration, historique
GitHub	Cloud	Dépôt hébergé	Collaboration équipe, CI/CD
ESLint	8.x (optionnel)	Linting JS	Qualité code (voir README)

E. Architecture & Infrastructure

Technologie	Rôle	Détails
Docker (optionnel)	Containerisation	Reproductibilité environnement

Technologie	Rôle	Détails
Linux/WSL2	OS cible	Ubuntu 20.04 sur WSL/VM
Port 3000	Next.js dev server	http://localhost:3000
Child Process Spawn	Backend invocation	Node.js exécute <code>./ordonnanceur --api</code>

F. Dépendances Frontend Complètes (package.json)

Dependencies (~50) :

- React ecosystem : @radix-ui/* (40+ UI components)
- Visualization : recharts (charts, gantt)
- Notifications : sonner (toast)
- Forms : react-hook-form, zod
- Utilities : clsx, tailwind-merge
- Other : lucide-react (icons), date-fns, etc.

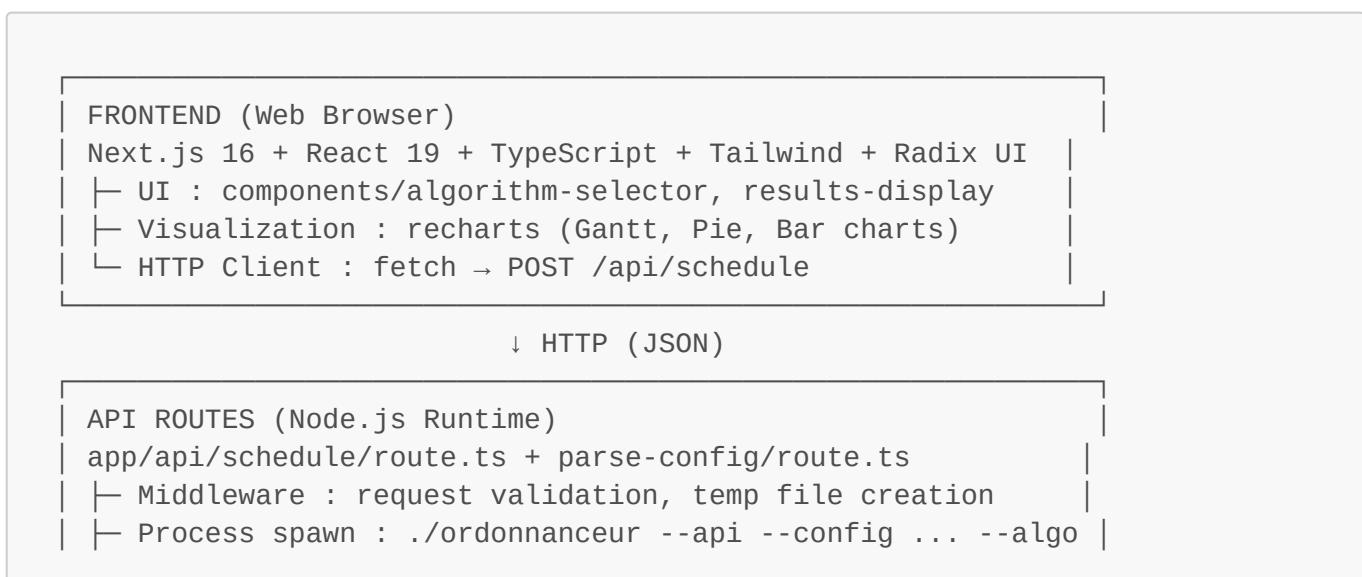
DevDependencies :

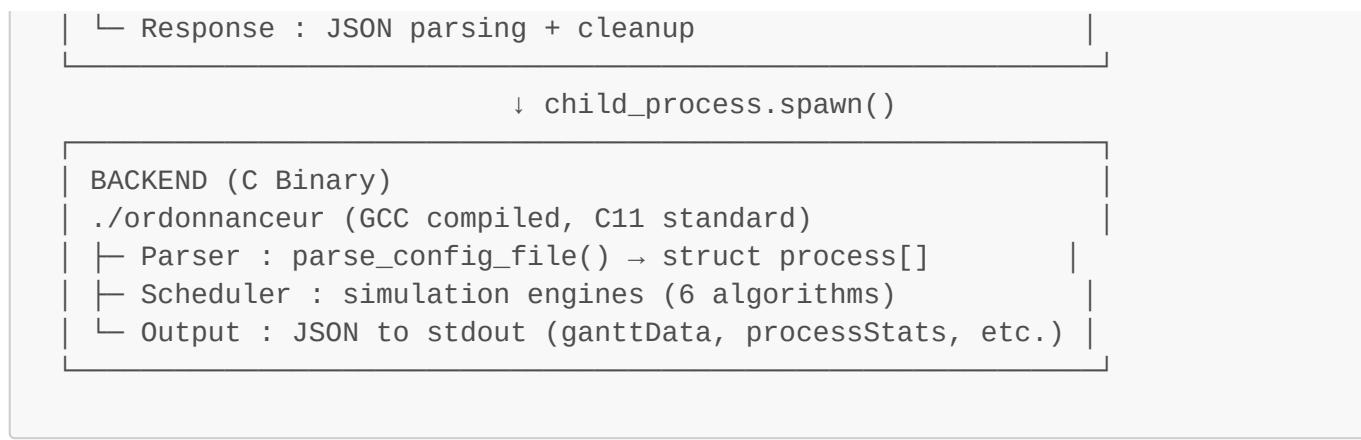
- @tailwindcss/postcss, tailwindcss (CSS framework)
- TypeScript types (@types/node, @types/react, @types/react-dom)

G. Interaction Frontend ↔ Backend

Composant	Technologie	Communication
Frontend (React)	Next.js + TypeScript	HTTP POST requests
API Route (Node.js)	<code>app/api/*/route.ts</code>	<code>child_process.spawn()</code>
Backend Binary (C)	<code>./ordonnanceur --api</code>	stdout JSON
Response	JSON over HTTP	<code>JSON.parse() → React render</code>

Tableau Récapitulatif - Stack par Couche





Versions Exactes du Projet

Frontend Stack :

```
{  
  "next": "16.0.3",  
  "react": "19.2.0",  
  "typescript": "^5",  
  "tailwindcss": "^4.1.9",  
  "recharts": "latest",  
  "pnpm": "10.24.0",  
  "node": "20.19.6"  
}
```

Backend Stack :

```
C Compiler : gcc 9.4.0  
Build Tool : make 4.2.1  
C Standard : C11  
Target OS : Linux (any POSIX-compliant)
```

Development Environment :

```
OS      : Ubuntu 20.04 LTS (or WSL2)  
IDE     : VS Code  
VCS     : Git 2.x + GitHub  
Runtime : Node.js 20.19.6 (frontend)  
          C runtime (backend)
```

4.2 Architecture du Projet

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

```

Projet-Ordonnancement-Linux/
|
|   └── FRONTEND (Next.js 16 + React 19 + TypeScript)
|
|       ├── app/                                # Next.js App Router
|       |   └── page.tsx                         # Page principale UI
|       |   └── layout.tsx                      # Layout racine (metadata,
|       |   |   |  ThemeProvider)
|       |       └── globals.css                 # Styles Tailwind globaux
|       |       └── api/                        # API Routes Next.js (Node.js
|       |           |   runtime)
|       |           |       └── schedule/
|       |           |           └── route.ts      # POST /api/schedule → lance
|       |           |       |   ordonnanceur --api
|       |           |           └── parse-config/
|       |           |               └── route.ts    # POST /api/parse-config → parse
|       |           |   fichier config
|       |
|       |       └── components/                # React Components
|       |           └── algorithm-selector.tsx # Dropdown algorithmes + params
|       |           |   (quantum, priorityOrder)
|       |           |   └── file-generation-dialog.tsx # Dialog génération config (nb
|       |           |   processus, ranges)
|       |           |   └── results-display.tsx     # Gantt interactif + Pie/Bar charts
|       |           |   + Table stats
|       |           |       └── theme-provider.tsx # Dark/Light theme (next-themes)
|       |           |           └── ui/            # Radix UI primitives (button,
|       |           |               card, dialog, tabs, etc.)
|       |
|       |       └── lib/                      # Utilitaires TypeScript
|       |           └── types.ts              # Interfaces (Process,
|       |               |   AlgorithmConfig, SchedulingResult, etc.)
|       |               |   └── utils.ts          # Helpers (cn pour classnames)
|       |
|       |       └── hooks/                  # Hooks React personnalisés
|       |           └── use-toast.ts        # Toast notifications (sonner)
|       |               └── use-mobile.ts  # Responsive breakpoint detection
|       |
|       |       └── public/                # Assets statiques (images, fonts,
|       |           |   etc.)
|       |
|       |       └── next.config.mjs        # Config Next.js (typescript,
|       |           |   images)
|       |           └── tsconfig.json      # Config TypeScript
|       |           └── postcss.config.mjs # PostCSS + Tailwind
|       |           └── components.json   # Shadcn UI config
|       |           └── package.json      # Deps (next, react, recharts,
|       |           radix-ui, etc.) + scripts
|       |           └── pnpm-lock.yaml    # Lock file pnpm
|       |               └── node_modules/  # Dependencies installées
|
|   └── BACKEND C (Moteur simulation)

```

```

    └── src/
        ├── main.c
        └── interactif, --api, --parse-config)
            ├── scheduler.c
            (fifo_simulation, etc.)
            ├── parser.c
            (parse_config_file)
            ├── generate_config.c
            (generate_config)
            └── utils.c
etc.)

    └── include/
        └── process.h
READY/RUNNING/BLOCKED/ZOMBIE
    ├── scheduler.h
simulation_result
    ├── parser.h
validate_config
    ├── generate_config.h
    └── utils.h

    └── policies/
(fonctions sélection)
    ├── fifo.c
    int, int, int)
    ├── priority_preemptive.c
    ├── roundrobin.c
    int)
    ├── srt.c
    int)
    ├── multilevel.c
    └── multilevel_dynamic.c
select_multilevel_dynamic(...)

    └── tests/
        ├── test_fifo.c
        ├── test_priority.c
        ├── test_roundrobin.c
        ├── test_multilevel.c
        ├── test_multilevel_dynamic.c
        ├── test_parser.c
        └── testfile.txt

    └── build/
make)
    └── ordonnanceur
        ├── ordonnanceur.exe
        └── Makefile
mrproper)
    └── tests/*.c
(binaires test_* non trackés)

# Code source C
# Point d'entrée (modes:
# Moteur simulation + simulations
# Parse fichiers config
# Génère configs aléatoires
# Utilitaires (display_config_file,
# Headers C
# struct process, NAME_LEN,
# Prototypes simulations, struct
# parse_config_file,
# generate_config
# display_config_file, etc.
# Algorithmes ordonnancement
# int fifo_scheduler(process*, int,
# int priority_preemptive(...),
# void round_robin(process*, int,
# void srt_simulation(process*,
# int select_multilevel(...),
# int
# Tests unitaires C
# Fichiers objets .o (généré par
# Binaire Linux compilé
# Binaire Windows cross-compiled
# Build system (all, clean,
# Sources de tests unitaires

```

```

    └── CONFIGURATION & DONNÉES
        └── config/
            ├── sample_config.txt
            ├── config_*.txt
            └── sample_config_*.txt
                # Fichiers configuration processus
                # Exemple par défaut (7 processus)
                # Configs générées (timestamp)
                # Configs générées par web UI

    └── DOCUMENTATION
        └── Documentation.md
            # Documentation technique complète
            (ce fichier)
        └── README.md
            # Guide utilisateur + install +
            usage
                └── API_REFERENCE.md
                └── ARCHITECTURE.md
                └── PROFESSIONAL_README.md
                └── PROJECT_SUMMARY.txt
                └── INDEX.md
                └── LICENSE
                # Référence API Next.js
                # Architecture détaillée
                # README professionnel
                # Résumé projet
                # Index navigation docs
                # MIT License

    └── CONFIGURATION RACINE
        └── .git/
        └── .gitignore
        .next, etc.)
        └── .next/
        └── .vscode/
            └── (aucun binaire de test tracké)
                # Dépôt Git local
                # Ignore (node_modules, build,
                # Cache Next.js (dev/production)
                # Settings VS Code
                # Les binaires
            test_* sont ignorés par .gitignore

```

Dépôt GitHub :

- URL: <https://github.com/arijsebai/Projet-Ordonnancement-Linux.git>
- Branch active : dev
- Remote : origin

Commandes usuelles :

```

# Vérifier l'état
git status

# Valider et pousser sur la branche active (dev)
git add -A
git commit -m "docs: mise à jour architecture et git"
git push origin dev

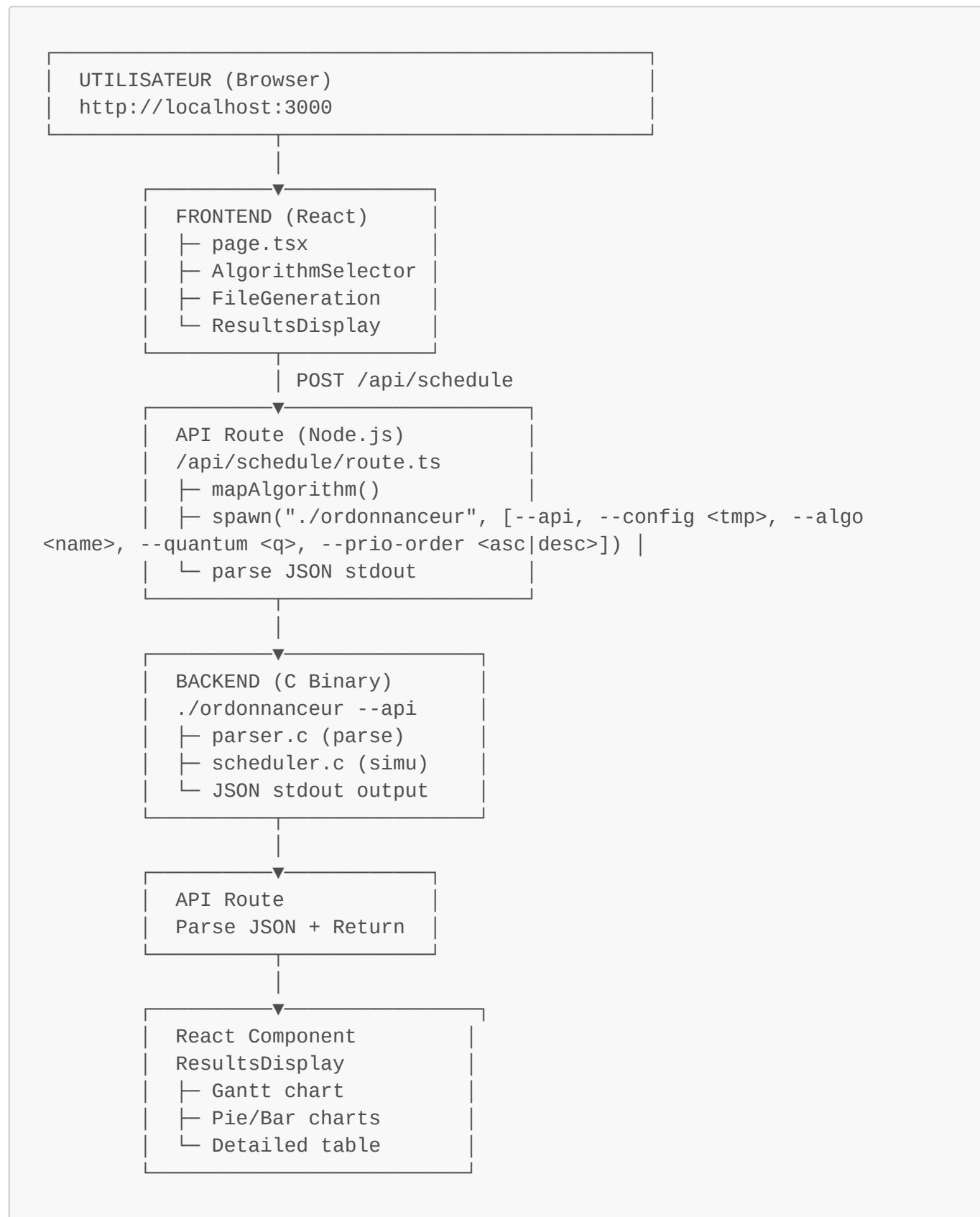
# Vérifier le remote et la branche courante
git remote -v
git rev-parse --abbrev-ref HEAD

```

.gitignore (extraits pertinents) :

- `node_modules/`, `.next/`, `build/` (artifacts Next.js et C)
- `test_*`, `mon_test_*` (binaires de test non trackés)
- `ordonnanceur` et `*.exe` (binaires compilés selon besoin)

Structure Logique par Rôle



4.3 Backend C : Modes d'Opération

Le backend C (**ordonnanceur**) supporte **3 modes** :

Mode	Commande	Output	Cas d'Usage
Interactif	<code>./ordonnanceur</code>	Texte + Gantt textuel	CLI local, démo
Direct File	<code>./ordonnanceur config.txt</code>	Texte + Gantt textuel	Scripts shell
API	<code>./ordonnanceur --api --config ... --algo ...</code>	JSON structuré	Routes Next.js
Parse Only	<code>./ordonnanceur --parse-config config.txt</code>	JSON array	Validation fichiers

Mode API (utilisé par frontend) :

```
./ordonnanceur --api --config sample_config.txt --algo fifo --quantum 4 --prio-order asc
```

Output JSON :

```
{
  "algorithm": "fifo",
  "ganttData": [{"process": "P1", "start": 0, "end": 5, "duration": 5}, ...],
  "processStats": [{"id": "P1", "waitTime": 0, "totalTime": 5, ...}, ...],
  "averageWait": 3.45,
  "makespan": 25
}
```

4.4 Intégration Frontend ↔ Backend

Flow complet : User → React → API Route → C Backend → Results

```
User (Browser)
  ↓ Sélectionne algorithme + paramètres
React Component (page.tsx)
  ↓ POST /api/schedule avec { processes, config }
API Route (app/api/schedule/route.ts)
  ↓ Écrit fichier temp + spawn("./ordonnanceur --api ...")
C Backend (ordonnanceur)
  ↓ Parse → Simulate → JSON stdout
API Route
  ↓ Parse JSON + cleanup temp file
```

React Component (ResultsDisplay)
 ↓ Affiche Gantt + Charts + Table

Routes API Next.js :

1. **POST /api/parse-config** : Upload fichier .txt → retourne array processes
2. **POST /api/schedule** : Lance simulation → retourne résultats complets

Mapping algorithmes (frontend → backend) :

Frontend	Backend C
fifo	fifo
priority_preemptive	priority_preemptive
round-robin	round-robin
multilevel	multilevel
multilevel-dynamic	multilevel-dynamic
srt	srt

4.5 Flow d'Exécution Complet

4.5 Visualisations Frontend

Components React :

1. **AlgorithmSelector** ([components/algorithm-selector.tsx](#))
 - Dropdown 6 algorithmes
 - Paramètres dynamiques : quantum (RR, Multilevel Dynamic), priorityOrder (Priority)
2. **ResultsDisplay** ([components/results-display.tsx](#))
 - **Gantt chart** : timeline interactif (play/pause, step, zoom)
 - **Pie chart** : répartition CPU par processus
 - **Bar chart** : temps attente vs temps total
 - **Table** : stats détaillées (arrival, execution, wait, finish, priority)
 - **Couleurs** : 20 couleurs distinctes, déterministe par process ID
3. **FileGenerationDialog** ([components/file-generation-dialog.tsx](#))
 - Dialog création config (nb processus, ranges arrival/exec/priority)

4.6 Mapping Algorithmes Frontend → Backend

Correspondance noms :

Frontend (TypeScript)	Backend C (--algo)	Fichier Policy
-----------------------	--------------------	----------------

Frontend (TypeScript)	Backend C (--algo)	Fichier Policy
fifo	fifo	policies/fifo.c
priority_preemptive	priority_preemptive	policies/priority_preemptive.c
round-robin	round-robin	policies/roundrobin.c
srt	srt	policies/srt.c
multilevel	multilevel	policies/multilevel.c
multilevel-dynamic	multilevel-dynamic	policies/multilevel_dynamic.c

Paramètres :

- **quantum** : requis pour **round-robin** et **multilevel-dynamic**
- **priorityOrder** : requis pour **priority_preemptive** (ascending/descending)
- **prio_mode** : 0=ascending (petite valeur=haute), 1=descending (grande valeur=haute)
- **Défaut CLI**: **prio_mode=1** (descending), **Défaut API**: **prio_mode=0** (ascending)

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

ID	User Story	Priorité
2	En tant que développeur, je veux un Makefile fonctionnel	Haute
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 ordonneurs de base et infrastructure

#	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	12 pts	Haute	18 h

Total Sprint 2 : 32 points (48 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	32	48	4
TOTAL		66	101.5	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	<code>./ordonnanceur</code>	Humain	Texte + Gantt textuel	CLI local
Direct File	<code>./ordonnanceur [fichier]</code>	Humain	Texte + Gantt textuel	Script shell rapide
API	<code>./ordonnanceur --api --config ... --algo ...</code>	Programme/Script	JSON structuré	Routes Next.js
Parse Only	<code>./ordonnanceur --parse-config [fichier]</code>	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	<code>name</code>	Chaîne	Sans espaces (ex: P1, processA)
2	<code>arrival_time</code>	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
```

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 \geq 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
<code>nb_processes</code>	Entier	Nombre de processus à générer	20
<code>max_arrival_time</code>	Entier	Temps d'arrivée maximal (min=0)	100
<code>min_priority</code>	Entier	Priorité minimale	0
<code>max_priority</code>	Entier	Priorité maximale	5
<code>max_exec_time</code>	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 $\geq \min_priority$)
- **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 `sprintf()` 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

Vue d'ensemble

Les headers C (`include/* .h`) définissent les **interfaces** et **structures de données** partagées entre tous les modules du projet. Ils assurent la **cohérence** et la **modularité** du code.

Fichiers headers disponibles :

- `process.h` : Structure process, constantes d'état
- `scheduler.h` : Prototypes simulations, structures résultats
- `parser.h` : Prototypes parsing configuration
- `generate_config.h` : Prototype générateur
- `utils.h` : Utilitaires affichage

6.4.1 process.h : Structure Cœur

Fichier : `include/process.h`

Contenu :

```
#ifndef PROCESS_H
#define PROCESS_H
```

```

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

struct process {
    char name[NAME_LEN];           // Nom processus (ex: "P1")
    int arrival_time;              // Temps d'arrivée ( $\geq 0$ )
    int exec_time;                 // Durée totale requise (immuable)
    int priority;                  // Priorité statique (petite valeur = haute)
    int remaining_time;            // Temps restant (modifiable)
    int waiting_time;              // Temps attente cumulé
    int status;                    // État: READY(0), RUNNING(1), BLOCKED(2),
ZOMBIE(3)
    int end_time;                  // Temps fin exécution (pour stats)
    int wait_time;                 // Pour aging dynamique (Multilevel)
};

#endif

```

Rôle :

- **Structure centrale** utilisée par tous les modules
 - **Constantes d'état** pour machine d'état processus
 - **Convention priorité** : petite valeur = haute priorité (Unix standard)
-

6.4.2 scheduler.h : Interfaces Simulation**Fichier :** include/scheduler.h**Contenu :**

```

#ifndef SCHEDULER_H
#define SCHEDULER_H

#include "process.h"

#define MAX_SEGMENTS 2048

struct gantt_segment {
    char process[NAME_LEN];        // Nom processus
    int start;                     // Temps début allocation CPU
    int end;                       // Temps fin allocation CPU
};

struct process_stat {
    char id[NAME_LEN];            // Nom processus
    int arrival_time;              // Arrivée
    int exec_time;                 // Durée exécution
}

```

```

    int finish_time;           // Temps fin
    int wait_time;            // Temps attente
    int priority;             // Priorité initiale
    int final_priority;       // Priorité finale (multilevel_dynamic)
};

struct simulation_result {
    char algorithm[64];        // Nom algorithme
    struct gantt_segment segments[MAX_SEGMENTS]; // Timeline Gantt
    int segment_count;          // Nombre segments
    struct process_stat stats[256]; // Stats processus
    int stat_count;             // Nombre processus
    double average_wait;        // Moyenne temps attente
    int makespan;               // Temps total simulation
};

struct scheduler_options {
    const char *algorithm;     // Nom algorithme (fifo, priority, etc.)
    int quantum;                // Quantum Round-Robin
    int prio_mode;              // 1=descending, 0=ascending
};

// Prototypes
void load_policies();
int choose_policy();
void run_scheduler(struct process *list, int n, int policy);
int run_scheduler_api(struct process *list, int n, const struct
scheduler_options *opts, struct simulation_result *out);
void print_json_result(const struct simulation_result *res);

// Simulations
void fifo_simulation(struct process *p, int n);
void priority_simulation(struct process *p, int n, int prio_mode);
void rr_simulation(struct process *p, int n);
void multilevel_simulation(struct process *p, int n, int quantum);
void multilevel_dynamic_simulation(struct process *p, int n, int quantum);
void srt_simulation(struct process *p, int n);

#endif

```

Rôle :

- **Structures résultats** pour mode API JSON
- **Options ordonnancement** (algorithme, quantum, prio_mode)
- **Prototypes simulations** pour tous les algorithmes
- **Interface API** pour routes Next.js

6.4.3 parser.h : Interface Parsing**Fichier :** include/parser.h

Contenu :

```
#ifndef PARSER_H
#define PARSER_H

#include "process.h"

// Parse fichier configuration
int parse_config_file(const char *filename, struct process **out, int *n);

// Validation format
int validate_config_line(const char *line);

#endif
```

Rôle :

- **Parsing fichiers** configuration texte
 - **Validation** format (4 champs, types corrects)
 - **Allocation dynamique** tableau processus
-

6.4.4 generate_config.h : Interface Générateur**Fichier :** include/generate_config.h**Contenu :**

```
#ifndef GENERATE_CONFIG_H
#define GENERATE_CONFIG_H

// Génère fichier config aléatoire
int generate_config(const char *filename);

#endif
```

Rôle :

- **Générateur automatique** configurations
 - **Création fichiers** avec timestamp
 - **Validation automatique** (toujours valide)
-

6.4.5 utils.h : Utilitaires**Fichier :** include/utils.h**Contenu :**

```
#ifndef UTILS_H
#define UTILS_H

// Affiche contenu fichier configuration
void display_config_file(const char *filename);

#endif
```

Rôle :

- **Affichage** fichiers configuration
 - **Utilitaires** divers (logs, debug)
-

Communication Headers ↔ Modules

```
main.c
└─ #include "process.h"           → struct process
└─ #include "scheduler.h"         → run_scheduler(), simulations
└─ #include "parser.h"           → parse_config_file()
└─ #include "generate_config.h"   → generate_config()
└─ #include "utils.h"             → display_config_file()

scheduler.c
└─ #include "process.h"           → struct process
└─ #include "scheduler.h"         → struct simulation_result

policies/fifo.c
└─ #include "process.h"           → struct process (définition)

tests/test_fifo.c
└─ #include "process.h"           → struct process pour tests
```

Avantages :

- **✓ Modularité** : chaque module inclut seulement ce dont il a besoin
 - **✓ Cohérence** : structure **process** définie une seule fois
 - **✓ Réutilisabilité** : headers partagés entre main, tests, policies
 - **✓ Maintenance** : modifier **process.h** → tous les modules mis à jour
-

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
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".

7.6 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**