

Ordonnancement et équité

Rapport de stage



Master d'informatique M2

Faculté de Sciences et Ingénierie de Sorbonne Université

Marion Caumartin

6 mars 2019

Table des matières

1	Introduction	1
2	Définition du problème	2
2.1	Ordonnancement	2
2.2	Equité	3
3	Propriétés	3
3.1	Ordonnancement sans-envi quand tous les agents veulent minimiser $\sum C_i$	6
4	Algorithme	7
4.1	Round-Robin	7
4.1.1	Round-Robin 2eme version	9
4.2	Ordonnancement sans-envi quand $m = 1$ et que tous les agents veulent minimiser $\sum C_i$	10

1 Introduction

Les problèmes d'ordonnancement constituent un domaine important en recherche opérationnelle. Ils traitent de l'affectation de tâches à des machines, et de l'exécution de ces tâches au cours du temps : il s'agit de savoir où - sur quelle machine - et quand commencera chaque tâche. Récemment, des problèmes d'ordonnancement en présence de différents acteurs ont été étudiés. Cependant, très peu de critères d'équité ont été appliqués aux problèmes d'ordonnancement (hormis le critère classique qui consiste à minimiser le coût maximal d'une machine).

La théorie du partage équitable est un domaine central en choix social computationnel. Elle s'intéresse à définir des règles d'affectation de ressources à des agents de manière à satisfaire au mieux les agents, sachant que les préférences de ceux-ci peuvent avoir différentes structures inhérentes au problème. Un concept fréquemment utilisé pour évaluer les affectations est celui de l'absence d'envie (envy freeness) : une affectation de ressources est dite sans-envie si aucun des agents ne préfère le lot de ressources d'un autre agent à son propre lot.

Le but de ce stage est d'appliquer des concepts et techniques développés en théorie du partage équitable, au domaine de l'ordonnancement. On cherche ainsi à évaluer la qualité des ordonnancements du point de vue de l'équité et à calculer des ordonnancements "équitables".

2 Définition du problème

2.1 Ordonnancement

On note m le nombre de machines.

On note s_i^j le slot de temps i de la machine j .

$\{1, \dots, n\}$ un ensemble d'agents.

Chaque agent k a un ensemble de $x \in \mathbb{N}$ tâches à réaliser et un critère f_k à minimiser. On note $f_k(s, J)$ le coût du slot pour la tâche J et pour l'agent k .

On note J_i^k la tâche i de l'agent k . On note J^k l'ensemble des tâches de l'agent k .

Chaque tâche J_i^k a une durée p_i^k , peut avoir une deadline d_i^k et une date de disponibilité r_i^k .

Dans un premier temps, on considère que $\forall k \in \{1, \dots, n\}, \forall i \in \{1, \dots, x\}, p_i^k = 1$.

Un ordonnancement σ est défini par les dates de début des tâches : $\sigma(J_i^k)$. On note \mathcal{S} l'ensemble des ordonnancements valides. On note $\sigma(k)$ l'ordonnancement de l'agent k pour l'ordonnancement σ . On note $\sigma(J^k)$ l'ordonnancement des tâches de J^k pour l'ordonnancement σ .

On note C_i^k la date de fin de la tâche i de l'agent k : $C_i^k = \sigma(J_i^k) + p_i^k$.

$C_{max}^k = \max_i C_i^k$: date de fin maximum (makespan)

$T_i^k = \max(0, C_i^k - d_i^k)$: retard

$L_i^k = C_i^k - d_i^k$: retard algébrique

$U_i^k = \begin{cases} 1 & \text{si } C_i^k > d_i^k \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$: vaut 1 si J_i^k est en retard, 0 sinon

$E_i^k = \max(0, d_i^k - C_i^k)$: avance

$S_i^k = (L_i^k)^2$

$D_i^k = |L_i^k|$

2.2 Équité

On cherche un ordonnancement où chaque agent a exactement x slot : $\forall k \in \{1, \dots, n\}, |\sigma(k)| = x$.

$$\forall k, k' \in \{1, \dots, n\}, \sigma(k) \cap \sigma(k') = \emptyset.$$

Les slots ne peuvent pas être divisés.

On note $f = (f_1, \dots, f_n)$.

Pareto-optimalité : σ domine σ' au sens de Pareto ssi

$$\begin{cases} \forall k \in \{1, \dots, n\}, f_k(\sigma(k)) \leq f_k(\sigma'(k)) \\ \exists k \in \{1, \dots, n\}, f_k(\sigma(k)) < f_k(\sigma'(k)) \end{cases}$$

utilitarian social welfare : minimiser $\sum_{k=1}^n f_k$.

egalitarian social welfare : minimiser $\max_{k=1}^n f_k$.

$$\text{leximin} : \sigma \succ_{lex} \sigma' \iff \exists i \in \{1, \dots, n-1\}, \begin{cases} \forall k < i, f_k(\sigma(k)) = f_k(\sigma'(k)) \\ f_i(\sigma(i)) < f_i(\sigma'(i)) \end{cases}$$

proportional fair share : on note f_k^* le coût si k disposait des machines pour lui seul.
pfs(k) = $n f_k^*$.

maxmin fair share : $\text{mfs}(k) = \min_{\sigma \in \mathcal{S}} \max_{i=1}^n f_k(\sigma(i))$.

Ordonnancement sans envie : $\forall k, j \in \{1, \dots, n\}, f_k(\sigma(k)) \leq f_k(\sigma(j))$

Envie entre deux agents : $e_{ij} = \max(0, f_i(\sigma(i)) - f_i(\sigma(j)))$

degré d'envie : $e_i = \max_j e_{ij}$ ou $e_i = \sum_j e_{ij}$

envie de la société : $\max_i e_i$ ou $\sum_i e_i$

Envie up to one slot : i envie j up to one slot ssi $\exists s \in \sigma(i), f_i(\sigma(i) \setminus s) \leq f_i(\sigma(j))$

Envie up to any slot : i envie j up to any slot ssi $\forall s \in \sigma(i), f_i(\sigma(i) \setminus s) \leq f_i(\sigma(j))$

Envie up to one job : i envie j up to one job ssi $\exists J \in J^i, f_i(\sigma(J^i \setminus J)) \leq f_i(\sigma(j))$

Envie up to any job : i envie j up to any job ssi $\forall J \in J^i, f_i(\sigma(J^i \setminus J)) \leq f_i(\sigma(j))$

3 Propriétés

Propriété 1. Au moins un ordonnancement egalitarian-optimal est Pareto-optimal.

Démonstration. Par l'absurde : on suppose qu'il n'existe pas d'ordonnancement egalitarian-optimal et Pareto-optimal.

Soit σ un ordonnancement egalitarian-optimal. σ n'est donc pas Pareto-optimal. Il existe donc un ordonnancement σ' Pareto-optimal qui domine σ et qui n'est pas egalitarian-optimal.

2 cas possibles :

- $\max_{i=1}^n f_i(\sigma'(i)) = \max_{i=1}^n f_i(\sigma(i))$: comme σ est egalitarian-optimal, alors σ' l'est aussi \implies contradiction.
- $\max_{i=1}^n f_i(\sigma'(i)) < \max_{i=1}^n f_i(\sigma(i))$: donc σ n'est pas egalitarian-optimal \implies contradiction. \square

Propriété 2. Un ordonnancement sans envie n'est pas toujours Pareto-optimal.

Exemple 1. On considère une instance avec une machine et deux agents A et B qui veulent optimiser le même critère. Chaque agent a deux tâches à exécuter sur la machine. On note A_i (resp. B_i) la tâche i de l'agent A (resp. B) pour $i \in \{1, 2\}$. Chaque tâche a une deadline : $d_1^A = 1$, $d_2^A = 3$, $d_1^B = 2$ et $d_2^B = 4$.

A_1	B_1	B_2	A_2
-------	-------	-------	-------

On appelle σ_1 l'ordonnancement suivant :

A_1	B_1	A_2	B_2
-------	-------	-------	-------

On appelle σ_2 l'ordonnancement suivant :

- Si A et B veulent minimiser $\sum T_i$: σ_1 est sans-envie mais n'est pas optimal. En effet, $\begin{cases} f_A(\sigma_1(A)) = 1 \leq f_A(\sigma_1(B)) = 1 \\ f_B(\sigma_1(B)) = 0 \leq f_B(\sigma_1(A)) = 0 \end{cases}$ et $\begin{cases} f_A(\sigma_2(A)) = 0 < f_A(\sigma_1(A)) = 1 \\ f_B(\sigma_2(B)) = 0 \leq f_B(\sigma_1(B)) = 0 \end{cases}$
- Si A et B veulent minimiser $\sum U_i$: σ_1 est sans-envie mais n'est pas optimal. En effet, $\begin{cases} f_A(\sigma_1(A)) = 1 \leq f_A(\sigma_1(B)) = 1 \\ f_B(\sigma_1(B)) = 0 \leq f_B(\sigma_1(A)) = 0 \end{cases}$ et $\begin{cases} f_A(\sigma_2(A)) = 0 < f_A(\sigma_1(A)) = 1 \\ f_B(\sigma_2(B)) = 0 \leq f_B(\sigma_1(B)) = 0 \end{cases}$
- Si A et B veulent minimiser $\sum E_i$: σ_1 est sans-envie mais n'est pas optimal. En effet, $\begin{cases} f_A(\sigma_1(A)) = 0 \leq f_A(\sigma_1(B)) = 0 \\ f_B(\sigma_1(B)) = 1 \leq f_B(\sigma_1(A)) = 1 \end{cases}$ et $\begin{cases} f_A(\sigma_2(A)) = 0 \leq f_A(\sigma_1(A)) = 0 \\ f_B(\sigma_2(B)) = 0 < f_B(\sigma_1(B)) = 1 \end{cases}$
- Si A et B veulent minimiser $\sum S_i$: σ_1 est sans-envie mais n'est pas optimal. En effet, $\begin{cases} f_A(\sigma_1(A)) = 1 \leq f_A(\sigma_1(B)) = 1 \\ f_B(\sigma_1(B)) = 1 \leq f_B(\sigma_1(A)) = 1 \end{cases}$ et $\begin{cases} f_A(\sigma_2(A)) = 0 < f_A(\sigma_1(A)) = 1 \\ f_B(\sigma_2(B)) = 0 < f_B(\sigma_1(B)) = 1 \end{cases}$
- Si A et B veulent minimiser $\sum D_i$: σ_1 est sans-envie mais n'est pas optimal. En effet, $\begin{cases} f_A(\sigma_1(A)) = 1 \leq f_A(\sigma_1(B)) = 1 \\ f_B(\sigma_1(B)) = 1 \leq f_B(\sigma_1(A)) = 1 \end{cases}$ et $\begin{cases} f_A(\sigma_2(A)) = 0 < f_A(\sigma_1(A)) = 1 \\ f_B(\sigma_2(B)) = 0 < f_B(\sigma_1(B)) = 1 \end{cases}$

Propriété 3. Minimiser $\sum L_i$ revient à minimiser $\sum C_i$.

Démonstration. $\sum L_i = \sum (C_i - d_i) = \sum C_i - \sum d_i$. Or $\sum d_i$ est une constante. Donc si on minimise $\sum C_i$, on minimise également $\sum L_i$. \square

Exemple 2. On considère une instance avec 2 machines, 3 agents A , B et D qui veulent optimiser $\sum C_i$. Chaque agent a 3 tâches à exécuter. On note A_i (resp. B_i et D_i) la tâche i de l'agent A (resp. B et D) pour $i \in \{1, 2, 3\}$.

A_1	D_1		A_2	B_3
B_1	D_3	B_2	A_3	D_2
A_1	D_1	D_2	D_3	B_3
B_1	B_2	A_2	A_3	

On appelle σ_1 l'ordonnancement suivant :

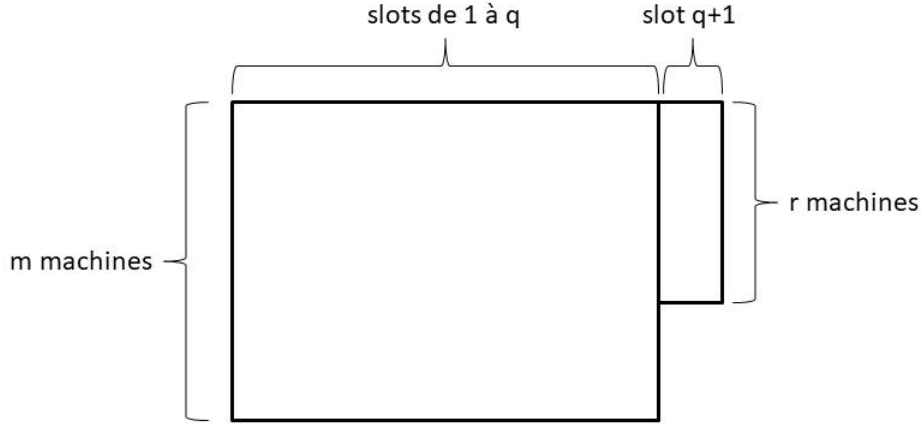
On appelle σ_2 l'ordonnancement suivant :

σ_1 est sans-envie mais n'est pas optimal. En effet,

$$\left\{ \begin{array}{l} f_A(\sigma_1(A)) = 9 \leq f_A(\sigma_1(B)) = 9 \\ f_A(\sigma_1(A)) = 9 \leq f_A(\sigma_1(D)) = 9 \end{array} \right\}, \left\{ \begin{array}{l} f_B(\sigma_1(B)) = 9 \leq f_B(\sigma_1(A)) = 9 \\ f_B(\sigma_1(B)) = 9 \leq f_B(\sigma_1(D)) = 9 \end{array} \right\},$$

$$\left\{ \begin{array}{l} f_D(\sigma_1(D)) = 9 \leq f_D(\sigma_1(A)) = 9 \\ f_D(\sigma_1(D)) = 9 \leq f_D(\sigma_1(B)) = 9 \end{array} \right\} \text{ et } \left\{ \begin{array}{l} f_A(\sigma_2(A)) = 8 < f_A(\sigma_1(A)) = 9 \\ f_B(\sigma_2(B)) = 9 \leq f_B(\sigma_1(B)) = 9 \\ f_D(\sigma_2(D)) = 8 < f_D(\sigma_1(D)) = 9 \end{array} \right\}.$$

Propriété 4. Si $nx = mq + r$, $\sum C_i = m \sum_{i=1}^q i + r(q + 1)$



Démonstration. L'ordonnancement de la figure précédente est optimal et contient $mq + r = nx$ slots. De plus la somme des dates de fins de cet ordonnancement vaut : $m \sum_{i=1}^q i + r(q + 1)$. \square

Propriété 5. Si $n \leq m$, il existe toujours un ordonnancement sans-envie.

Démonstration. Il suffit d'affecter une machine à chaque agents. \square

Propriété 6. Si $n > m$, il n'existe pas d'ordonnancement sans-envie si tous les agents veulent minimiser le makespan.

3.1 Ordonnancement sans-envi quand tous les agents veulent minimiser $\sum C_i$

On pose : $n = 2mq_n + r_n$ et $x = 2mq_x + r_x$.

Propriété 7. Si $r_n r_x = 2mq' + m$, il existe un ordonnancement sans-envie et Pareto-optimal.

Démonstration. $nx = 4m^2 q_n q_x + 2mq_n r_x + 2mq_x r_n + r_n r_x = m(2q_x n + 2q_n r_x + 2q' + 1)$

$$\begin{aligned} \sum C_i &= m(2q_x n + 2q_n r_x + 2q' + 1)(q_x n + q_n r_x + q' + 1) \\ &= n[2q_x(q_x n + q_n r_x + q' + 1) + q_x(2q_n r_x + 2q' + 1)] + (2mq_n r_x + 2mq' + m)(q_n r_x + q' + 1) \\ &= n[2q_x(q_x n + q_n r_x + q' + 1) + q_x(2q_n r_x + 2q' + 1)] + (2mq_n r_x + r_n r_x)(q_n r_x + q' + 1) \\ &= n[2q_x(q_x n + q_n r_x + q' + 1) + q_x(2q_n r_x + 2q' + 1)] + nr_x(q_n r_x + q' + 1) \\ &= n[2q_x(q_x n + q_n r_x + q' + 1) + q_x(2q_n r_x + 2q' + 1) + r_x(q_n r_x + q' + 1)] \end{aligned}$$

Il existe donc un ordonnancement sans-envie et Pareto-optimal. \square

Propriété 8. Si $r_n r_x = 2mq'$, il existe un ordonnancement sans-envie et Pareto-optimal ssi on n'a pas n pair et x impair.

Démonstration. $nx = 4m^2 q_n q_x + 2mq_n r_x + 2mq_x r_n + r_n r_x = m(2q_x n + 2q_n r_x + 2q')$

$$\begin{aligned} \sum C_i &= m(2q_x n + 2q_n r_x + 2q' + 1)(q_x n + q_n r_x + q') \\ &= n[2q_x(q_x n + q_n r_x + q') + q_x(2q_n r_x + 2q' + 1)] + (2mq_n r_x + 2mq' + m)(q_n r_x + q') \\ &= n[2q_x(q_x n + q_n r_x + q') + q_x(2q_n r_x + 2q' + 1)] + (2mq_n r_x + r_n r_x + m)(q_n r_x + q') \\ &= n[2q_x(q_x n + q_n r_x + q') + q_x(2q_n r_x + 2q' + 1)] + (nr_x + m)(q_n r_x + q') \\ &= n[2q_x(q_x n + q_n r_x + q') + q_x(2q_n r_x + 2q' + 1) + r_x(q_n r_x + q')] + mq_n r_x + q' \\ &= n[2q_x(q_x n + q_n r_x + q') + q_x(2q_n r_x + 2q' + 1) + r_x(q_n r_x + q')] + \frac{nr_x}{2} \end{aligned}$$

Si r_x est pair, $\sum C_i = n[2q_x(q_x n + q_n r_x + q') + q_x(2q_n r_x + 2q' + 1) + r_x(q_n r_x + q') + \frac{r_x}{2}]$. Si r_x est pair alors x est pair. Si x est pair, il existe un ordonnancement sans-envie et Pareto-optimal.

Si r_x est impair, alors x est impair. Comme nx est pair, n est pair.

$$r_x = 2p + 1$$

$$\sum C_i = n[2q_x(q_x n + q_n r_x + q') + q_x(2q_n r_x + 2q' + 1) + r_x(q_n r_x + q') + p] + \frac{n}{2}$$

Il n'existe donc pas d'ordonnancement sans-envie et Pareto-optimal. \square

Propriété 9. Il existe un ensemble de slots tel qu'il peut exister un ordonnancement qui permet à chaque agent d'avoir un coût de $\lceil \frac{\sum C_i}{n} \rceil$. Cet ensemble de slots est obtenu en décalant le dernier slot de l'ensemble optimal d'au plus $n - 1$ pas de temps.

Démonstration. On pose $nx = mq + r$ et $\sum C_i = nq_1 + r_1$. Si $\sum C_i$ n'est pas multiple de n i.e. $r_1 \neq 0$: on décale le dernier slot de $n - r_1$

$$\begin{aligned} - r = 0 : \sum C_i + (q + n - r_1) - q &= nq_1 + r_1 + n - r_1 = n(q_1 + 1) = n \lceil \frac{\sum C_i}{n} \rceil \\ - r \neq 0 : \sum C_i + (q + 1 + n - r_1) - (q + 1) &= nq_1 + r_1 + n - r_1 = n(q_1 + 1) = n \lceil \frac{\sum C_i}{n} \rceil \end{aligned}$$

□

Exemple 3. On considère un ensemble de m machines et $n = m + 1$ agents. Soit $k \in \mathbb{N}^*$. Chaque agent a $x = 2mk + 1$ tâches à exécuter.

$$nx = 2mkn + m + 1 = m(2kn + 1) + 1$$

$$\begin{aligned} \sum C_i &= m \sum_{i=1}^{2kn+1} i + 2kn + 2 \\ &= m(2kn + 1)(kn + 1) + 2kn + 2 \\ &= m(2k^2n^2 + 2kn + kn + 1) + 2kn + 2 \\ &= n(2k^2nm + 3km + 2k) + m + 2 \\ &= n(2k^2nm + 3km + 2k + 1) + 1 \end{aligned}$$

Si on décale le dernier slot de $n - 1$ pas de temps on obtient :

$$\begin{aligned} \sum C_i - (2kn + 2) + (2kn + 2 + n - 1) &= m \sum_{i=1}^{2kn+1} i + 2kn + 2 + n - 1 \\ &= m(2kn + 1)(kn + 1) + 2kn + 2 + n - 1 \\ &= m(2k^2n^2 + 2kn + kn + 1) + 2kn + 2 + n - 1 \\ &= n(2k^2nm + 3km + 2k + 1) + m + 2 - 1 \\ &= n(2k^2nm + 3km + 2k + 2) \end{aligned}$$

Ce qui fait exactement $n \lceil \frac{\sum C_i}{n} \rceil$

4 Algorithme

4.1 Round-Robin

On considère que tous les agents ont au moins deux tâches.

L'algorithme fonctionne de la façon suivante :

- Chaque agent donne pour chacune de ses tâches un coût aux différents slots.
- On définit un ordre p des agents.
- A chaque tour, chaque agent choisit le slot qui lui coûte le moins.

Exemple 4. On considère une instance avec deux machines et trois agents A , B , et D . Les agents A et B veulent minimiser $\sum T_i$ et l'agent D veut minimiser $\sum C_i$. Chaque agent a trois tâches à exécuter. On note A_i (resp. B_i et D_i) la tâche i de l'agent A (reps. B et D) pour $i \in \{1, 2, 3\}$. Chaque tâche a une deadline : $d_1^A = 3$, $d_2^A = 1$, $d_3^A = 1$, $d_1^B = 1$, $d_2^B = 2$, $d_3^B = 3$, $d_1^D = 2$, $d_2^D = 4$, et $d_3^D = 4$. On considère l'ordre suivant : DBA . En cas d'égalité des coûts on considère les règles suivantes :

- 1 on choisit la tâche qui a la plus petite deadline
- 2 on choisit la tâche qui a l'indice le plus petit
- 3 on choisit le slot le plus proche de la dealine
- 4 on choisit la machine avec l'indice le plus petit.

Le tableau des coûts est le suivant :

	s_1^1	s_2^1	s_3^1	s_4^1	s_5^1	s_1^2	s_2^2	s_3^2	s_4^2
A_1	0	0	0	1	2	0	0	0	1
A_2	0	1	2	3	4	0	1	2	3
A_3	0	1	2	3	4	0	1	2	3
B_1	0	1	2	3	4	0	1	2	3
B_2	0	0	1	2	3	0	0	1	2
B_3	0	0	0	1	2	0	0	0	1
D_1	1	2	3	4	5	1	2	3	4
D_2	1	2	3	4	5	1	2	3	4
D_3	1	2	3	4	5	1	2	3	4

Tour 1 :

- Agent D : les slots qui lui coûtent le moins sont s_1^1 et s_1^2 pour chacune de ses tâches. Il choisit donc d'affecter D_1 au slot s_1^1 .
- Agent B : les slots qui lui coûtent le moins sont s_1^2 pour B_1 , s_2^1 , s_1^2 et s_2^2 pour B_2 , et s_2^1 , s_2^2 et s_3^2 pour B_3 . Il choisit donc d'affecter B_1 au slot s_1^2 .
- Agent A : les slots qui lui coûtent le moins sont s_2^1 , s_3^1 , s_2^2 et s_3^2 pour A_1 . Il choisit donc d'affecter A_1 au slot s_3^1 .

D_1		A_1		
B_1				

Tour 2 :

- Agent D : les slots qui lui coûtent le moins sont s_2^1 et s_2^2 pour D_2 et D_3 . Il choisit donc d'affecter D_2 au slot s_2^1 .
- Agent B : les slots qui lui coûtent le moins sont s_2^2 pour B_2 , et s_2^2 et s_3^2 pour B_3 . Il choisit donc d'affecter B_2 au slot s_2^2 .
- Agent A : le slot qui lui coûtent le moins est s_3^2 pour A_2 et A_3 . Il choisit donc d'affecter A_2 au slot s_3^2 .

D_1	D_2	A_1		
B_1	B_2	A_2		

Tour 3 :

- Agent D : les slots qui lui coûtent le moins sont s_4^1 et s_4^2 . Il choisit donc d'affecter D_3 au slot s_4^1 .
- Agent B : le slot qui lui coûtent le moins est s_4^2 . Il choisit donc d'affecter B_3 au slot s_4^2 .
- Agent A : le seul slot restant est s_5^1 . Il choisit donc d'affecter A_3 au slot s_5^1 .

D_1	D_2	A_1	D_3	A_3
B_1	B_2	A_2	B_3	

L'ordonnancement obtenu est sans-envie up to one job :

- Agent A : $f_A(\sigma(A)) = 6$, $f_A(\sigma(B)) = 4$ et $f_A(\sigma(D)) = 4$. Mais si on lui retire A_3 : $f_A(\sigma(\{A_1, A_2\})) = 2$.
- Agent B : $f_B(\sigma(B)) = 1$, $f_B(\sigma(A)) = 5$ et $f_B(\sigma(D)) = 1$.
- Agent D : $f_D(\sigma(D)) = 7$, $f_D(\sigma(A)) = 11$ et $f_D(\sigma(B)) = 7$.

Propriété 10. Cet algorithme est sans-envie up to one job si les coûts sont positifs et que les agents considèrent soit le coût maximal, soit la somme des coûts.

Démonstration. Soit p un ordre sur les agents. Soient $i, j \in \{1, \dots, n\}$. On note s_i^t le slot alloué à l'agent i au tour t et J_t^i la tâche associée, pour $t \in \{1, \dots, x\}$. On note σ l'ordonnancement obtenu avec l'algorithme présenté dans cette partie.

Cas 1 : $i < j$

A chaque tour, $p(i)$ choisi le slot libre le moins coûteux pour lui avant $p(j)$:

$$\forall t \in \{1, \dots, x\}, f_{p(i)}(s_{p(i)}^t) \leq f_{p(i)}(s_{p(j)}^t)$$

$$\text{Si } i \text{ considère le coût maximal : } f_{p(i)}(\sigma(i)) = \max_{t=1}^x f_{p(i)}(s_{p(i)}^t) \leq f_{p(i)}(\sigma(j)) = \max_{t=1}^x f_{p(i)}(s_{p(j)}^t)$$

$$\text{Si } i \text{ considère la somme des coûts : } f_{p(i)}(\sigma(i)) = \sum_{t=1}^x f_{p(i)}(s_{p(i)}^t) \leq f_{p(i)}(\sigma(j)) = \sum_{t=1}^x f_{p(i)}(s_{p(j)}^t)$$

Cas 2 : $i > j$

Soit $t \in \{1, \dots, x-1\}$.

Le slot alloué à $p(i)$ au tour t lui coûte moins que le slot alloué à $p(j)$ au tour $t+1$:

$$f_{p(i)}(s_{p(i)}^t) \leq f_{p(i)}(s_{p(j)}^{t+1})$$

Si i considère le coût maximal :

$$f_{p(i)}(\sigma(J^{p(i)} \setminus \{J_{p(i)}^x\})) = \max_{t=1}^{x-1} f_{p(i)}(s_{p(i)}^t) = f_{p(i)}(s_{p(i)}^{x-1}) \leq f_{p(i)}(s_{p(j)}^x) = f_{p(i)}(\sigma(j))$$

Si i considère la somme des coûts :

$$f_{p(i)}(\sigma(J^{p(i)} \setminus \{J_{p(i)}^x\})) = \sum_{t=1}^{x-1} f_{p(i)}(s_{p(i)}^t) \leq \sum_{t=2}^x f_{p(i)}(s_{p(j)}^t) \leq \sum_{t=1}^x f_{p(i)}(s_{p(j)}^t) = f_{p(i)}(\sigma(j)). \quad \square$$

4.1.1 Round-Robin 2eme version

On considère que tous les agents ont au moins deux tâches.

L'algorithme fonctionne de la façon suivante :

- Chaque agent attribut un vecteur coût aux différents slots.
- On définit un ordre p des agents.
- A chaque tour, chaque agent choisit le slot qui lui coûte le moins.

Propriété 11. Cet algorithme est sans-envie up to one job si tous les vecteurs coûts sont comparables soit le coût maximal, soit la somme des coûts.

Démonstration. Soit p un ordre sur les agents. Soient $i, j \in \{1, \dots, n\}$. On note s_i^t le slot alloué à l'agent i au tour t et J_t^i la tâche associée, pour $t \in \{1, \dots, x\}$. On note σ l'ordonnancement obtenu avec l'algorithme présenté dans cette partie.

Cas 1 : $i < j$

A chaque tour, $p(i)$ choisi le slot libre le moins coûteux pour lui avant $p(j)$:

$$\forall t \in \{1, \dots, x\}, f_{p(i)}(s_{p(i)}^t, J_{p(i)}^t) \leq f_{p(i)}(s_{p(j)}^t, J_{p(i)}^t)$$

$$\text{Si } i \text{ considère le coût maximal : } f_{p(i)}(\sigma(i)) = \max_{t=1}^x f_{p(i)}(s_{p(i)}^t, J_{p(i)}^t) \leq f_{p(i)}(\sigma(j)) = \max_{t=1}^x f_{p(i)}(s_{p(j)}^t, J_{p(i)}^t)$$

$$\text{Si } i \text{ considère la somme des coûts : } f_{p(i)}(\sigma(i)) = \sum_{t=1}^x f_{p(i)}(s_{p(i)}^t, J_{p(i)}^t) \leq f_{p(i)}(\sigma(j)) = \sum_{t=1}^x f_{p(i)}(s_{p(j)}^t, J_{p(i)}^t)$$

Cas 2 : $i > j$

Soit $t \in \{1, \dots, x-1\}$.

Le slot alloué à $p(i)$ au tour t lui coûte moins que le slot alloué à $p(j)$ au tour $t+1$:

$$f_{p(i)}(s_{p(i)}^t, J_{p(i)}^t) \leq f_{p(i)}(s_{p(j)}^{t+1}, J_{p(i)}^{t+1})$$

Si i considère le coût maximal :

$$f_{p(i)}(\sigma(J^{p(i)} \setminus \{J_{p(i)}^x\})) = \max_{t=1}^{x-1} f_{p(i)}(s_{p(i)}^t, J_{p(i)}^t) = f_{p(i)}(s_{p(i)}^{x-1}, J_{p(i)}^{x-1}) \leq f_{p(i)}(s_{p(j)}^x, J_{p(i)}^x) = f_{p(i)}(\sigma(j))$$

Si i considère la somme des coûts :

$$f_{p(i)}(\sigma(J^{p(i)} \setminus \{J_{p(i)}^x\})) = \sum_{t=1}^{x-1} f_{p(i)}(s_{p(i)}^t, J_{p(i)}^t) \leq \sum_{t=2}^x f_{p(i)}(s_{p(j)}^t, J_{p(i)}^t) \leq \sum_{t=1}^x f_{p(i)}(s_{p(j)}^t, J_{p(i)}^t) = f_{p(i)}(\sigma(j)).$$

□

4.2 Ordonnancement sans-envi quand $m = 1$ et que tous les agents veulent minimiser $\sum C_i$

Dans cette section, on présente un algorithme qui renvoie un ordonnancement sans-envie quand $m = 1$ et que tous les agents veulent minimiser $\sum C_i$. On considère que $n \geq 2$ et $x \geq 2$.

— x **pair** : on répète la séquence suivante $\frac{x}{2}$ fois :

a_1	\dots	a_n	a_n	\dots	a_1
-------	---------	-------	-------	---------	-------

Exemple 5. $n = 3$ et $x = 4$. On note les agents a, b et c .

a	b	c	c	b	a	a	b	c	c	b	a
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Chaque agent a un coût de 26. Cet ordonnancement est sans-envi.

Propriété 12. L'ordonnancement obtenu est sans-envi

Démonstration. La somme des dates de fin de tous les slots qui seront alloués est :

$$\sum_{i=1}^{nx} i = n \frac{x}{2} (nx + 1). \text{ Pour que l'ordonnancement soit sans-envi, il faut que le coût de l'or-}$$

donnancement pour chaque agent soit $\frac{x}{2}(nx + 1)$.

Soit $i \in \{1, \dots, n\}$. A l'itération j de la séquence, l'agent a_i aura les slots $2n(j-1) + i$ et $2n(j-1) + 2n + 1 - i$. Le coût de l'agent a_i à l'itération j de la séquence est donc : $4n(j-1) + 2n + 1$.

Le coût total pour l'agent a_i est :

$$\sum_{j=1}^{\frac{x}{2}} (4n(j-1) + 2n + 1) = 4n \frac{\frac{x}{2}(\frac{x}{2} - 1)}{2} + (2n + 1) \frac{x}{2} = nx \frac{x}{2} - nx + nx + \frac{x}{2} = \frac{x}{2}(nx + 1).$$

Cet ordonnancement est bien sans-envi. \square

- **x impair et n impair** : A partir du slot $3n + 1$, on répète la séquence suivante $\frac{x-3}{2}$ fois :

a_1	\dots	a_n	a_n	\dots	a_1
-------	---------	-------	-------	---------	-------

Pour les $3n$ premiers slots on considère l'allocation suivante :

- pour $i \in \{1, \dots, \frac{n+1}{2}\}$ on alloue à a_i les slots $3n + 1 - i$, $\frac{3n+3}{2} - i$, et $2i - 1$.
- pour $i \in \{\frac{n+3}{2}, \dots, n\}$ on alloue à a_i les slots $3n + 1 - i$, $2i - n - 1$, et $\frac{5n+3}{2} - i$.

Exemple 6. $n = 3$ et $x = 5$. On note les agents a , b et c .

a	c	b	b	a	c	c	b	a	a	b	c	c	b	a
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Chaque agent a un coût de 40. Cet ordonnancement est sans-envi.

Propriété 13. L'ordonnancement est valide et sans-envi.

Démonstration. Soit $i \in \{1, \dots, n\}$.

Montrons que l'allocation des $3n$ premiers slots est valide (aucun slot n'est alloué deux fois et tous les slots sont alloués).

- pour les slots $\{1, \dots, n\}$:

$$1 \leq i \leq \frac{n+1}{2}$$

$$2 \leq 2i \leq n+1$$

$$1 \leq 2i - 1 \leq n$$

$$\frac{n+3}{2} \leq i \leq n$$

$$n+3 \leq 2i \leq 2n$$

$$2 \leq 2i - n - 1 \leq n - 1$$

ensemble des entiers impairs entre 1 et n

ensemble des entiers pairs entre 1 et n

Entre 1 et n , tous les slot sont alloués exactement une fois.

- pour les slots $\{n+1, \dots, 2n\}$:

$$1 \leq i \leq \frac{n+1}{2}$$

$$-\frac{n+1}{2} \leq -i \leq -1$$

$$n+1 \leq -i + \frac{3n+3}{2} \leq \frac{3n+1}{2}$$

ensemble des entiers entre $n+1$ et $\frac{3n+1}{2}$

$$\frac{n+3}{2} \leq i \leq n$$

$$-n \leq -i \leq -\frac{n+3}{2}$$

$$\frac{3n+3}{2} \leq -i + \frac{5n+3}{2} \leq 2n$$

ensemble des entiers entre $\frac{3n+3}{2}$ et $2n$

Entre $n+1$ et $2n$, tous les slot sont alloués exactement une fois.

- pour les slots $\{2n+1, \dots, 3n\}$:

$$1 \leq i \leq \frac{n+1}{2}$$

$$-\frac{n+1}{2} \leq -i \leq -1$$

$$\frac{5n+1}{2} \leq 3n+1-i \leq 3n$$

ensemble des entiers entre $\frac{5n+1}{2}$ et $3n$

$$\frac{n+3}{2} \leq i \leq n$$

$$-n \leq -i \leq -\frac{n+3}{2}$$

$$2n+1 \leq 3n+1-i \leq \frac{5n-1}{2}$$

ensemble des entiers entre $2n+1$ et $\frac{5n-1}{2}$

Entre $2n+1$ et $3n$, tous les slot sont alloués exactement une fois.

Cette ordonnancement est donc valide. Montrons maintenant que l'ordonnancement est sans-envi. Nous avons montré précédemment que le coût total des slots est $n\frac{x}{2}(nx+1)$. Pour que l'ordonnancement soit équitable, l'ordonnancement de chaque agent doit avoir un

coût de $\frac{x}{2}(nx + 1)$.

Calculons le coût de l'agent a_i pour les $3n$ premiers slots :

- si $i \in \{1, \dots, \frac{n+1}{2}\}$, le coût pour l'agent a_i si on ne considère que les $3n$ premiers slots est :

$$3n + 1 - i + \frac{3n+3}{2} - i + 2i - 1 = \frac{9n+3}{2}$$
- si $i \in \{\frac{n+1}{2}, \dots, n\}$, le coût pour l'agent a_i si on ne considère que les $3n$ premiers slots est :

$$3n + 1 - i + 2i - n - 1 + \frac{5n+3}{2} - i = \frac{9n+3}{2}$$

a_1	\dots	a_n	a_n	\dots	a_1

A l'itération j de la séquence , le coût de l'agent a_i est :
 $3n + 2n(j-1) + i + 3n + 2n(j-1) + 2n + 1 - i = 4nj + 4n + 1$.

Le coût total de l'agent a_i est donc :

$$\begin{aligned}
\frac{9n+3}{2} + \sum_{i=1}^{\frac{x-3}{2}} (4nj + 4n + 1) &= \frac{9n+3}{2} + \frac{x-3}{2} + 2n(x-3) + n(x-3)(\frac{x-3}{2} + 1) \\
&= \frac{9n+3}{2} + (x-3)(\frac{1}{2} + 2n + n(\frac{x-3}{2} + 1)) \\
&= \frac{9n+3}{2} + (x-3)(\frac{3n+1}{2} + n\frac{x}{2}) \\
&= x\frac{3n+1}{2} + nx\frac{x}{2} - 3n\frac{x}{2} \\
&= \frac{x}{2}(nx + 1)
\end{aligned}$$

Cet ordonnancement est donc sans-envie. □

— **x impair et n pair** : On retire le slot $3n + 1 - \frac{n}{2}$, et à partir du slot $3n + 2$, on répète la

séquence suivante $\frac{x-3}{2}$ fois :

a_1	\dots	a_n	a_n	\dots	a_1
-------	---------	-------	-------	---------	-------

Pour les $3n$ premiers slots on considère l'allocation suivante :

- pour $i \in \{1, \dots, \frac{n}{2}\}$ on alloue à a_i les slots $3n + 2 - i$, $\frac{3n+2}{2} - i$, et $2i - 1$.
- pour $i \in \{\frac{n+2}{2}, \dots, n\}$ on alloue à a_i les slots $3n + 1 - i$, $2i - n$, et $\frac{5n+2}{2} - i$.

Exemple 7. $n = 4$ et $x = 5$. On note les agents a, b, c et d .

a	c	b	d	b	a	d	c	d	c		b	a	a	b	c	d
d	c	b	a													

Chaque agent a un coût de 55. Cet ordonnancement est sans-envi.

Propriété 14. L'ordonnancement est valide et sans-envi.

Démonstration. Soit $i \in \{1, \dots, n\}$.

Montrons que l'allocation des $3n$ premiers slots est valide (aucun slot n'est alloué deux fois et tous les slots sont alloués).

- pour les slots $\{1, \dots, n\}$:

$$\begin{aligned} 1 &\leq i \leq \frac{n}{2} \\ 2 &\leq 2i \leq n \\ 1 &\leq 2i - 1 \leq n - 1 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{n+2}{2} &\leq i \leq n \\ n+2 &\leq 2i \leq 2n \\ 2 &\leq 2i - n \leq n \end{aligned}$$

ensemble des entiers impairs entre 1 et n ensemble des entiers pairs entre 1 et n
Entre 1 et n , tous les slot sont alloués exactement une fois.

- pour les slots $\{n+1, \dots, 2n\}$:

$$\begin{aligned} 1 &\leq i \leq \frac{n}{2} \\ -\frac{n}{2} &\leq -i \leq -1 \\ n+1 &\leq \frac{3n}{2} + 1 - i \leq \frac{3n}{2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{n+2}{2} &\leq i \leq n \\ -n &\leq -i \leq -\frac{n+2}{2} \\ \frac{3n+2}{2} &\leq \frac{5n+2}{2} - i \leq 2n \end{aligned}$$

ensemble des entiers entre $n+1$ et $\frac{3n}{2}$ ensemble des entiers entre $\frac{3n+2}{2}$ et $2n$.

Entre $n+1$ et $2n$, tous les slot sont alloués exactement une fois.

- pour les slots $\{2n+1, \dots, 3n+1\}$:

$$\begin{aligned} 1 &\leq i \leq \frac{n}{2} \\ -\frac{n}{2} &\leq -i \leq -1 \\ \frac{5n+4}{2} &\leq 3n+2-i \leq 3n+1 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{n+2}{2} &\leq i \leq n \\ -n &\leq -i \leq -\frac{n+2}{2} \\ 2n+1 &\leq 3n+1-i \leq \frac{5n}{2} \end{aligned}$$

ensemble des entiers entre $\frac{5n+4}{2}$ et $3n$ ensemble des entiers entre $2n+1$ et $\frac{5n}{2}$

Entre $2n+1$ et $3n+1$, tous les slot sont alloués exactement une fois sauf le slot $\frac{5n+2}{2}$.

Cette ordonnancement est donc valide. Montrons maintenant que l'ordonnancement est sans-envi. Déterminons dans un premier temps le coût total des slots :

$$\left(\sum_{i=1}^{nx+1} i\right) - \frac{5n+2}{2} = \frac{(nx+1)(nx+2)}{2} - \frac{5n+2}{2} = n\left(x\frac{nx+3}{2} - \frac{5}{2}\right)$$

Pour que l'ordonnancement soit sans-envi, le coût de chaque agent doit être $x\frac{nx+3}{2} - \frac{5}{2}$.

Calculons le coût de l'agent a_i pour les $3n+1$ premiers slots :

- si $i \in \{1, \dots, \frac{n+1}{2}\}$, le coût pour l'agent a_i si on ne considère que les $3n$ premiers slots est :

$$3n+2-i + \frac{3n+2}{2} - i + 2i - 1 = \frac{9n+4}{2}$$

- si $i \in \{\frac{n+1}{2}, \dots, n\}$, le coût pour l'agent a_i si on ne considère que les $3n$ premiers slots est :

$$3n+1-i + 2i - n + \frac{5n+2}{2} - i = \frac{9n+4}{2}$$

A l'itération j de la séquence

a_1	\dots	a_n	a_n	\dots	a_1
-------	---------	-------	-------	---------	-------

, le coût de l'agent a_i est :
 $3n+1+2n(j-1)+i+3n+1+2n(j-1)+2n+1-i = 4nj+4n+3$.

Le coût total de l'agent a_i est donc :

$$\begin{aligned}
\frac{9n+4}{2} + \sum_{i=1}^{\frac{x-3}{2}} (4nj + 4n + 3) &= \frac{9n+4}{2} + 3\frac{x-3}{2} + 2n(x-3) + n(x-3)\left(\frac{x-3}{2} + 1\right) \\
&= \frac{9n+4}{2} + (x-3)\left(\frac{3}{2} + 2n + n\left(\frac{x-3}{2} + 1\right)\right) \\
&= \frac{9n+4}{2} + (x-3)\left(\frac{3n+3}{2} + n\frac{x}{2}\right) \\
&= x\frac{3n+3}{2} + nx\frac{x}{2} - \frac{5}{2} - 3n\frac{x}{2} \\
&= \frac{x}{2}(nx+3) - \frac{5}{2}
\end{aligned}$$

Cet ordonnancement est donc sans-envie. \square

Cet ordonnancement est sans-envie mais la somme totale des dates de fins est supérieure à $n\lceil \frac{\sum C_i}{n} \rceil$.

$$\sum C_i = \sum_{i=1}^{nx} i = \frac{nx(nx+1)}{2} = \frac{n^2}{2}x^2 + \frac{n}{2}x = \frac{n^2}{2}x^2 + \frac{x-1}{2}n + \frac{n}{2} = n\left(\frac{n}{2}x^2 + \frac{x-1}{2}\right) + \frac{n}{2}.$$

Donc $n\lceil \frac{\sum C_i}{n} \rceil = \frac{n}{2}x^2 + \frac{x+1}{2}$.

On considère l'ordonnancement suivant :

On répète la séquence suivante $\frac{x-3}{2}$ fois :

a_1	\dots	a_n	a_n	\dots	a_1
-------	---------	-------	-------	---------	-------

On décale le dernier slot de $\frac{n}{2}$ pas de temps.

Pour les $3n$ derniers slots on considère l'allocation suivante :

- pour $i \in \{1, \dots, \frac{n}{2}\}$ on alloue à a_i les slots $2i + n(x-3)$, $\frac{3n+4}{2} - i + n(x-3)$, et $3n - i + n(x-3)$.
- pour $i \in \{\frac{n+2}{2}, \dots, n-1\}$ on alloue à a_i les slots $2i - n + 1 + n(x-3)$, $\frac{5n+2}{2} + n(x-3)$, et $3n - i + n(x-3)$.
- on alloue à l'agent a_n les slots $1 + n(x-3)$, $n + 1 + n(x-3)$ et $3n + \frac{n}{2} + n(x-3)$.

Exemple 8. $n = 4$ et $x = 5$. On note les agents a, b, c et d .

a	b	c	d	d	c	b	a	a	b	d	c	a	c	b	d	d
c	b			a												

Chaque agent a un coût de 53. Cet ordonnancement est sans-envi.

Propriété 15. L'ordonnancement est valide et sans-envi.

Démonstration. Soit $i \in \{1, \dots, n\}$.

Montrons que l'allocation des $3n$ derniers slots est valide (aucun slot n'est alloué deux fois et tous les slots sont alloués). Pour simplifier l'écriture on omet le terme $n(x-3)$.

- pour les slots $\{1, \dots, n\}$:

$$\begin{aligned}
1 &\leq i \leq \frac{n}{2} \\
2 &\leq 2i \leq n
\end{aligned}$$

ensemble des entiers pairs entre 2 et n

$$\begin{aligned}
\frac{n+2}{2} &\leq i \leq n-1 \\
n+2 &\leq 2i \leq 2n-2
\end{aligned}$$

$$3 \leq 2i - n + 1 \leq n - 1$$

ensemble des entiers impairs entre 2 et n

Entre 1 et n , tous les slot sont alloués exactement une fois.

- pour les slots $\{n+1, \dots, 2n\}$:

$$\begin{array}{ll}
 1 \leq i \leq \frac{n}{2} & \frac{n+2}{2} \leq i \leq n-1 \\
 -\frac{n}{2} \leq -i \leq -1 & -n+1 \leq -i \leq -\frac{n+2}{2} \\
 n+2 \leq \frac{3n+4}{2} - i \leq \frac{3n+2}{2} & \frac{3n+4}{2} \leq \frac{5n+2}{2} - i \leq 2n \\
 \text{ensemble des entiers entre } n+2 \text{ et } \frac{3n+2}{2} & \text{ensemble des entiers entre } \frac{3n+4}{2} \text{ et } 2n.
 \end{array}$$

Entre $n+1$ et $2n$, tous les slot sont alloués exactement une fois.

- pour les slots $\{2n+1, \dots, 3n+1\}$:

$$\begin{array}{ll}
 1 \leq i \leq \frac{n}{2} & \frac{n+2}{2} \leq i \leq n-1 \\
 -\frac{n}{2} \leq -i \leq -1 & -n+1 \leq -i \leq -\frac{n+2}{2} \\
 \frac{5n}{2} \leq 3n-i \leq 3n-1 & 2n+1 \leq 3n-i \leq \frac{5n-2}{2} \\
 \text{ensemble des entiers entre } \frac{5n}{2} \text{ et } 3n-1 & \text{ensemble des entiers entre } 2n+1 \text{ et } \frac{5n-2}{2}
 \end{array}$$

Entre $2n+1$ et $3n-1$, tous les slot sont alloués exactement une fois. Le slot $3n + \frac{n}{2}$ est alloué exactement une fois.

Cette ordonnancement est donc valide. Montrons maintenant que l'ordonnancement est sans-envi. Déterminons dans un premier temps le coût total des slots :

$$\left(\sum_{i=1}^{nx} i \right) - nx + nx + \frac{n}{2} = \frac{(nx+1)(nx)}{2} + \frac{n}{2} = n \left(\frac{n}{2}x^2 + \frac{x+1}{2} \right)$$

Pour que l'ordonnancement soit sans-envi, le coût de chaque agent doit être $\frac{n}{2}x^2 + \frac{x+1}{2}$.

Calculons le coût de l'agent a_i pour les $3n$ derniers slots :

- si $i \in \{1, \dots, \frac{n}{2}\}$, le coût pour l'agent a_i si on ne considère que les $3n$ derniers slots est :

$$2i + n(x-3) + \frac{3n+4}{2} - i + n(x-3) = 3n - i + n(x-3) = 3nx - \frac{9n}{2} + 2$$
- si $i \in \{\frac{n+1}{2}, \dots, n\}$, le coût pour l'agent a_i si on ne considère que les $3n$ derniers slots est :

$$2i - n + 1 + n(x-3) + \frac{5n+2}{2} - i + n(x-3) + 3n - i + n(x-3) = 3nx - \frac{9n}{2} + 2$$
- si $i = n$, le coût pour l'agent a_i si on ne considère que les $3n$ derniers slots est :

$$1 + n(x-3) + n + 1 + n(x-3) + 3n + \frac{n}{2} + n(x-3) = 3nx - \frac{9n}{2} + 2$$

a_1	\dots	a_n	a_n	\dots	a_1

A l'itération j de la séquence, le coût de l'agent a_i est :
 $2n(j-1) + i + 2n(j-1) + 2n + 1 - i = 4nj - 2n + 1.$

Le coût total de l'agent a_i est donc :

$$\begin{aligned}
3nx - \frac{9n}{2} + 2 + \sum_{j=1}^{\frac{x-3}{2}} (4nj - 2n + 1) &= 3nx - \frac{9n}{2} + 2 + 4n \frac{\frac{x-3}{2}(\frac{x-3}{2} + 1)}{2} - 2n \frac{x-3}{2} + \frac{x-3}{2} \\
&= 3nx - \frac{9n}{2} + n(x-3) \frac{x-1}{2} - n(x-3) + \frac{x+1}{2} \\
&= \frac{n}{2}x^2 + \frac{x+1}{2}
\end{aligned}$$

Cet ordonnancement est donc sans-envie. □