



Année Académique: 2025/2026 **Domaine:** Mathématiques et Informatique
Filière: Informatique
Spécialité: architectures distribuées
Niveau: Master 1 **Période:** Semestre 2
Matière: Modélisation, simulation et évaluation des performances
Section/Groupe: SECTION 1 / groupe 2

Enseignant: BOUROUIS Abdelhabib

PV des notes CC par matière (Enseignant)

#	Matricule	Nom	Prénom	Note CC	Note corrigée	Signature
1	202034001055			12.38		
2	212134001562			12.75		
3	202034001228			0.91		
4	222234006402			14.0		
5	212134009465			10.59		
6	202034001306			0.0		
7	202034001479			0.0		
8	222234016307			12.88		
9	202034004714			9.14		
10	212234083506			11.25		
11	222234032303			12.5		
12	222234020918			6.93		
13	212134001397			10.5		
14	222234092511			12.25		
15	222234009515			9.34		
16	212134009307			10.63		
17	212134013567			5.68		
18	212134000839			11.39		
19	212234084320			10.75		
20	2100404618			0.0		
21	222234038120			6.69		
22	212134004747			11.17		
23	212134013404			8.64		
24	202034006110			0.0		
25	212134002626			12.25		
26	212134013832			7.18		
27	222234019604			12.5		
28	202034003126			11.75		
29	212134008255			11.63		
30	222234009809			12.05		
31	222234051902			9.55		
32	212134008890			12.0		
33	212134008365			9.84		
34	212134004908			12.55		
35	212134001632			8.18		
36	222234045317			14.3		
37	212134001433			0.0		
38	151534054159			11.84		



Année Académique: 2025/2026 **Domaine:** Mathématiques et Informatique
Filière: Informatique
Spécialité: architectures distribuées
Niveau: Master 1 **Période:** Semestre 2
Matière: Modélisation, simulation et évaluation des performances
Section/Groupe: SECTION 1 / groupe 1

Enseignant: BOUROUIS Abdelhabib

PV des notes CC par matière (Enseignant)

#	Matricule	Nom	Prénom	Note CC	Note corrigée	Signature
1	181834008709			11.0		
2	202034003252			13.5		
3	212134007315			12.3		
4	212134002713			11.63		
5	212134009494			14.05		
6	222234042119			12.25		
7	191934002485			12.84		
8	172134013815			0.0		
9	222234084318			17.0		
10	212134005124			10.89		
11	191934004641			12.18		
12	222234021504			12.5		
13	202034008505			0.0		
14	212134006756			0.0		
15	222234039103			0.0		
16	212134008302			11.43		
17	212234088310			11.39		
18	202034001311			9.0		
19	212134001649			0.0		
20	202034007785			8.55		
21	202034003319			8.82		
22	212134000927			13.59		
23	222234029502			13.75		
24	131334011605			0.0		
25	222234007920			11.5		
26	25044076527			12.34		
27	222234008314			11.8		
28	212134008856			11.18		
29	191934001289			0.0		
30	181834007997			0.0		
31	191934001461			0.0		
32	222234038207			11.5		
33	212134001728			4.23		
34	25084002846			8.48		
35	212134008183			13.0		
36	222234030215			13.0		
37	212134003323			9.55		
38	25124000858			12.0		



Année Académique: 2025/2026 **Domaine:** Mathématiques et Informatique
Filière: Informatique
Spécialité: architectures distribuées
Niveau: Master 1 **Période:** Semestre 2
Matière: Modélisation, simulation et évaluation des performances
Section/Groupe: SECTION 1 / groupe 2

Enseignant: BOUROUIS Abdelhabib

PV des notes CC par matière (Enseignant)

#	Matricule	Nom	Prénom	Note CC	Note corrigée	Signature
1	202034001055			10.59		
2	212134001562			15.5		
3	202034001228			0.0		
4	222234006402			13.8		
5	212134009465			9.18		
6	202034001306			0.0		
7	202034001479			0.0		
8	222234016307			13.59		
9	202034004714			9.59		
10	212234083506			16.25		
11	222234032303			14.84		
12	222234020918			10.14		
13	212134001397			13.17		
14	222234092511			13.84		
15	222234009515			9.34		
16	212134009307			13.0		
17	212134013567			7.58		
18	212134000839			14.05		
19	212234084320			14.8		
20	2100404618			0.0		
21	222234038120			9.14		
22	212134004747			11.0		
23	212134013404			8.68		
24	202034006110			0.0		
25	212134002626			13.34		
26	212134013832			13.52		
27	222234019604			13.05		
28	202034003126			15.75		
29	212134008255			16.3		
30	222234009809			16.8		
31	222234051902			11.6		
32	212134008890			16.75		
33	212134008365			10.55		
34	212134004908			16.35		
35	212134001632			5.86		
36	222234045317			18.13		
37	212134001433			0.0		
38	151534054159			12.55		



Année Académique: 2025/2026 **Domaine:** Mathématiques et Informatique
Filière: Informatique
Spécialité: architectures distribuées
Niveau: Master 1 **Période:** Semestre 2
Matière: Modélisation, simulation et évaluation des performances
Section/Groupe: SECTION 1 / groupe 1

Enseignant: BOUROUIS Abdelhabib

PV des notes CC par matière (Enseignant)

#	Matricule	Nom	Prénom	Note CC	Note corrigée	Signature
1	181834008709			11.59		
2	202034003252			15.96		
3	212134007315			14.59		
4	212134002713			13.94		
5	212134009494			16.0		
6	222234042119			18.3		
7	191934002485			9.14		
8	172134013815			0.0		
9	222234084318			19.05		
10	212134005124			15.1		
11	191934004641			15.34		
12	222234021504			13.34		
13	202034008505			0.0		
14	212134006756			0.0		
15	222234039103			0.0		
16	212134008302			14.43		
17	212234088310			13.59		
18	202034001311			9.03		
19	212134001649			0.0		
20	202034007785			18.1		
21	202034003319			5.74		
22	212134000927			13.7		
23	222234029502			12.44		
24	131334011605			0.0		
25	222234007920			16.8		
26	25044076527			13.99		
27	222234008314			13.18		
28	212134008856			12.43		
29	191934001289			0.0		
30	181834007997			0.0		
31	191934001461			0.0		
32	222234038207			14.35		
33	212134001728			7.77		
34	25084002846			12.09		
35	212134008183			16.87		
36	222234030215			18.75		
37	212134003323			11.05		
38	25124000858			12.05		



Année Académique: 2025/2026 **Domaine:** Mathématiques et Informatique
Filière: Informatique
Spécialité: architectures distribuées
Niveau: Master 1 **Période:** Semestre 2
Matière: Modélisation, simulation et évaluation des performances
Section/Groupe: SECTION 1

Enseignant: BOUROUIS Abdelhabib

PV des notes des examens par matière (Enseignant)

#	Matricule	Nom	Prénom	Note Examen	Note corrigée	Signature
1	202034001055			7.0		
2	212134001562			6.25		
3	202034001228			0.0		
4	222234006402			5.5		
5	212134009465			0.0		
6	181834008709			6.25		
7	202034001306			0.0		
8	202034003252			6.75		
9	202034001479			0.0		
10	212134007315			6.0		
11	222234016307			5.5		
12	202034004714			5.5		
13	212234083506			7.0		
14	212134002713			6.0		
15	212134009494			9.0		
16	222234032303			6.0		
17	222234042119			7.0		
18	191934002485			6.25		
19	172134013815			0.0		
20	222234084318			12.0		
21	212134005124			9.25		
22	222234020918			6.0		
23	191934004641			6.0		
24	222234021504			6.5		
25	212134001397			5.25		
26	222234092511			5.5		
27	202034008505			0.0		
28	222234009515			5.25		
29	212134009307			5.5		
30	212134006756			0.0		
31	212134013567			8.5		
32	222234039103			0.0		
33	212134008302			7.5		
34	212234088310			6.25		
35	212134000839			6.25		
36	202034001311			5.25		
37	212134001649			0.0		
38	212234084320			6.0		
39	2100404618			0.0		
40	222234038120			5.75		
41	202034007785			8.25		
42	202034003319			6.75		
43	212134004747			6.0		
44	212134000927			8.75		
45	222234029502			6.25		
46	131334011605			0.0		
47	222234007920			8.0		
48	25044076527			8.0		
49	212134013404			5.25		
50	202034006110			0.0		
51	212134002626			6.25		
52	222234008314			9.0		
53	212134013832			11.0		
54	212134008856			6.0		
55	222234019604			6.0		
56	202034003126			9.75		
57	191934001289			0.0		
58	212134008255			8.0		
59	222234009809			8.0		
60	222234051902			8.5		
61	181834007997			0.0		
62	191934001461			0.0		
63	212134008890			8.25		
64	222234038207			5.75		
65	212134001728			8.0		
66	25084002846			8.0		
67	212134008183			9.0		
68	212134008365			5.25		
69	222234030215			8.25		
70	212134004908			10.25		
71	212134001632			10.0		
72	212134003323			5.75		
73	222234045317			6.5		
74	212134001433			0.0		
75	151534054159			8.0		
76	25124000858			6.5		

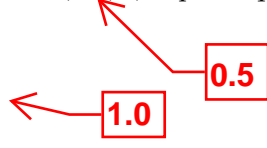
Model Answer + Grading Rubric

Solution de l'exercice 01 : (ROUTEUR : 06 Points)

Données : $\lambda = 60$ paquets/s, $\mu = 75$ paquets/s, $S = 2500$ octets/paquet

1. La file d'attente qui modélise correctement ce système est **M/M/1/N** parce que :

- (a) Arrivées selon le processus de Poisson (énoncé).
- (b) Temps de service exponentiel (énoncé).
- (c) Nombre de serveurs $m = 1$ (énoncé).
- (d) Discipline de service *FIFO* (par défaut).
- (e) Capacité finie (N paquets dans le système (taille mémoire limitée)).
- (f) Population de taille finie (par défaut).



2. L'espace (taille) mémoire requis pour atteindre l'objectif, si chaque paquet nécessite 2500 octets est :

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu} = \frac{60}{75} = 0,8 \neq 1, P_0 = \frac{1-\rho}{1-\rho^{N+1}}, P_N = \frac{(1-\rho)\rho^N}{1-\rho^{N+1}}$$

Le taux d'arrivée effectif est λ_e . Pour satisfaire au moins 95% des paquets arrivés, $\frac{\lambda_e}{\lambda} \geq 0.95$ doit être vérifié.

$$\frac{\lambda_e}{\lambda} \geq 0.95 \implies \frac{\lambda(1-P_N)}{\lambda} \geq 0.95 \implies 1 - P_N \geq 0.95 \implies 1 - \frac{(1-\rho)\rho^N}{1-\rho^{N+1}} \geq 0.95 \implies \frac{1-\rho^N}{1-\rho^{N+1}} \leq 0.05$$

$$\text{Ainsi : } \frac{\lambda_e}{\lambda} \geq 0.95 \implies \rho^N(1 - 0.95\rho) \leq 0.05 \implies \frac{0.05}{1-0.95\rho} \implies N \ln(\rho) \leq \ln\left(\frac{0.05}{1-0.95\rho}\right) \implies N \geq \frac{\ln\left(\frac{0.05}{1-0.95\rho}\right)}{\ln(\rho)}$$

$$N \geq \frac{\ln\left(\frac{0.05}{1-0.95\rho}\right)}{\ln(\rho)} \implies N \geq \frac{\ln\left(\frac{0.05}{1-0.95 \times 0.8}\right)}{\ln(0.8)} \implies N \geq \frac{-1.5686159179}{-0.22314355} \implies N \geq 7.0296269315$$



Finalement, au moins **N = 8**. Espace mémoire requis = **N × 2500 = 9600 = 8 × 2500 = 20000 Octets**.

3. Le nombre de paquets traités par jours :

Puisqu'il y a un rejet et seulement une partie du flux est traité par le routeur, nous utilisons le taux d'occupation effectif :

$$P_N = P_8 = \frac{(1-0.8)(0.8)^8}{1-(0.8)^{8+1}} = \frac{0.033554432}{0.865782272} = 0.0387562012$$

$$\rho_e = \frac{\lambda_e}{\mu} = \frac{\lambda(1-P_N)}{\mu} = \frac{60 \times (1-0.0387562012)}{75} = 0.768995038$$

La durée d'activité par jour (24 hours) : $24 \times \rho_e = 24 \times 0.768995038 = 18.455880912$ heures = 1107.35285472 minutes = 66441.1712832 seconds.

$$Nb = \left\lfloor \frac{\text{Durée d'activité}}{S} \right\rfloor = \lfloor \text{Durée d'activité} \times \mu \rfloor = \lfloor 66441.1712832 \times 75 \rfloor = \lfloor 4983087.84 \rfloor \implies Nb = 4983087 \text{ paquets}$$

4. Le nombre moyen de paquets en attente :

$$P_0 = \frac{1-\rho}{1-\rho^{N+1}} = 0.231004961$$

$$\bar{Q} = \frac{(m\rho)^m \rho P_0}{m!(1-\rho)^2} [1 - \rho^{N-m} - (N-m)(1-\rho)\rho^{N-m}] = \frac{0.8^2 \times 0.231004961}{(0.2)^2} [1 - 0.8^7 - 7(1-0.8)0.8^7]$$

$$\text{Ainsi, } \bar{Q} = 1.835781714$$



Solution de l'exercice 02 : (CODE JAVA POUR M/M/M : 07 Points)

```

1 import java.util.LinkedList;
2 import java.util.Queue;
3 import java.util.Random;
4 import java.util.Vector;
5
6 public class MMmStat {
7     static Random r = new Random(); static int freeServers;
8     static double lambda, mu, t, tNext, experimentDuration = 50000, rho, lastOccup, tBar, nbTbar,
9         nBar, lastnBar;
10    static int nbClientsService, nbWaitingClients, i, nbServers = 5, nbSys;
11    static Vector<Notice> futureEventList = new Vector<Notice>(), queue = new Vector<Notice>();
12
13    public static void main(String[] args) {
14        lambda = 0.51; mu = 0.57; i = 1; t = 0; nbClientsService = 0; nbWaitingClients = 0;
15        rho = 0; lastOccup = 0; tBar = 0; nbTbar = 0; nBar = 0; lastnBar = 0; nbSys = 0;
    
```



```

15     freeServers = nbServers; insertNotice(new Notice(i, true, t)); i++; simulation();
16 }
17 public static void simulation() {
18     while (!futureEventList.isEmpty() && t <= experimentDuration) {
19         Notice n = getNotice(); t = n.EvTime;
20         if (n.EvType) { arrival(n); } else { endService(n); }
21     }
22     rho = 1-(rho/nbServers/t);
23     System.out.println("Rho = " + rho);
24     nBar = nBar / t;
25     System.out.println("nBar = " + nBar);
26     tBar = tBar / nbTbar;
27     System.out.println("tBar = " + tBar);
28 }
29 public static void arrival(Notice n) {
30     tNext = t + exponential(lambda); insertNotice(new Notice(i, true, tNext)); i++;
31     nBar = nBar + nbSys * (t - lastnBar);
32     lastnBar = t;
33     nbSys++;
34     if (freeServers>0)
35         rho = rho + freeServers*(t-lastOccup);
36         lastOccup = t;
37         freeServers--;
38     tNext = t + exponential(mu);
39     n.EvTime = tNext; n.EvType = false; insertNotice(n);
40 } else { queue.add(n); }
41 }
42 public static void endService(Notice n) {
43     nbClientsService++;
44     tBar = tBar + (t - n.ArrDate);
45     nbTbar++;
46     nBar = nBar + nbSys * (t - lastnBar);
47     lastnBar = t;
48     nbSys--;
49     if (!queue.isEmpty()) {
50         Notice n1 = queue.remove(0); tNext = t + exponential(mu);
51         n1.EvTime = tNext; n1.EvType = false; insertNotice(n1);
52     } else {
53         rho=rho+freeServers*(t-lastOccup);
54         lastOccup = t;
55         freeServers++;
56     }
57 }
58 public static double exponential(double rate) {
59     return -Math.log(r.nextDouble())/rate;
60 }
61 public static void insertNotice(Notice n) {
62     int i = 0; boolean inserted = false;
63     while(i<futureEventList.size() && !inserted) {
64         if(n.EvTime>=(futureEventList.get(i)).EvTime) {
65             i++;
66         }else{ futureEventList.add(i, n); inserted = true; }
67     }
68     if(!inserted) futureEventList.addElement(n);
69 }
70 public static Notice getNotice() {
71     return futureEventList.remove(0);
72 }
73 }

```

Listing 2 – MMmStat.java

Solution de l'exercice 03 : (RÉSEAU DE FILES D'ATTENTE : 07 Points)

Nous avons : $\gamma = 4, m_1 = +\infty, m_2 = 1, m_3 = 2, \mu_1 = 5, \mu_2 = 8, \mu_3 = 6$.

1. Matrices de routage :

Matrice de routage interne : $\begin{pmatrix} \frac{2}{3} - \alpha & \alpha & \frac{1}{3} \\ \frac{1}{4} & 0 & 0 \\ \frac{1}{4} & 0 & 0 \end{pmatrix}$, Matrice de routage externe : $\begin{pmatrix} 0 \\ 3 \\ 4 \\ 4 \end{pmatrix}$

2. Taux d'arrivées effectifs λ_i :

Les équations de trafic sont : $\lambda_i = \gamma_i + \sum_{j=1}^3 \lambda_j p_{ji}$.

Donc :
$$\begin{cases} \lambda_1 = 4 + \left(\frac{2}{3} - \alpha\right) \lambda_1 + \frac{1}{4} \lambda_2 + \frac{1}{4} \lambda_3, \\ \lambda_2 = \alpha \lambda_1, \\ \lambda_3 = \frac{1}{3} \lambda_1. \end{cases}$$

En remplaçant λ_2 et λ_3 dans la première équation : $\lambda_1 = 4 + \left(\frac{2}{3} - \alpha + \frac{\alpha}{4} + \frac{1}{12}\right) \lambda_1$.

Or $\frac{2}{3} + \frac{1}{12} = \frac{3}{4}$, $-\alpha + \frac{\alpha}{4} = -\frac{3\alpha}{4}$. Donc : $\lambda_1 = 4 + \frac{3}{4}(1 - \alpha)\lambda_1$.

Ainsi : $\left(1 - \frac{3}{4}(1 - \alpha)\right) \lambda_1 = 4$, d'où $\frac{1 + 3\alpha}{4} \lambda_1 = 4$.

Finalement, $\lambda_1 = \frac{16}{1 + 3\alpha}$, $\lambda_2 = \frac{16\alpha}{1 + 3\alpha}$, $\lambda_3 = \frac{16}{3(1 + 3\alpha)}$

3. Valeurs de α qui assurent la stabilité du réseau :

Comme α est une probabilité de routage, on doit avoir $0 \leq \alpha \leq \frac{2}{3}$.

La station 1 est une file $M/M/\infty$, donc elle est toujours stable.

Pour la station 2, qui est une file $M/M/1$, il faut $\rho_2 = \frac{\lambda_2}{\mu_2} < 1$.

Donc : $\rho_2 = \frac{16\alpha}{8(1+3\alpha)} = \frac{2\alpha}{1+3\alpha}$. Pour $0 \leq \alpha \leq \frac{2}{3}$, on a bien : $\rho_2 < 1$.

Pour la station 3, qui est une file $M/M/2$, il faut que $\rho_3 = \frac{\lambda_3}{2\mu_3} < 1$. Donc $\rho_3 = \frac{1}{12} \cdot \frac{16}{3(1+3\alpha)} = \frac{4}{9(1+3\alpha)}$. Pour $0 \leq \alpha \leq \frac{2}{3}$, on a aussi $\rho_3 < 1$.

Ainsi, toutes les valeurs admissibles de α assurent la stabilité : $0 \leq \alpha \leq \frac{2}{3}$.

Cas particulier : $\alpha = \frac{1}{2}$

On a $\lambda_1 = \frac{16}{1 + 3/2} = \frac{16}{5/2} = \frac{32}{5} = 6.400000$, $\lambda_2 = \frac{1}{2} \lambda_1 = \frac{16}{5} = 3.200000$, $\lambda_3 = \frac{1}{3} \lambda_1 = \frac{32}{15} = 2.133333$.

4. Nombre moyen de clients en attente :

Station 1 : $M/M/\infty$ Il n'y a pas d'attente dans une file $M/M/\infty$, donc $\bar{Q}_1 = 0$

Station 2 : $M/M/1$

$\rho_2 = \frac{\lambda_2}{\mu_2} = \frac{3.2}{8} = 0.400000$. Pour une file $M/M/1$, $\bar{Q}_2 = \frac{\rho_2^2}{1 - \rho_2}$. Donc $\bar{Q}_2 = \frac{0.4^2}{1 - 0.4} = \frac{0.16}{0.6} = \frac{4}{15} = 0.266667$

Station 3 : $M/M/2$

Nous avons $\rho_3 = \frac{\lambda_3}{m_3 \mu_3} = \frac{32}{15 \times 2 \times 6} = \frac{8}{45} = 0.17777778$. La probabilité que la station 3 soit vide est

$$P_0 = \left[\frac{(m_3 \rho_3)^{m_3}}{m_3! (1 - \rho_3)} + \sum_{k=0}^{m_3-1} \frac{(m_3 \rho_3)^k}{k!} \right]^{-1} = \left[\frac{(2 \times \frac{8}{45})^2}{2! (1 - \frac{8}{45})} + \sum_{k=0}^{2-1} \frac{(2 \times \frac{8}{45})^k}{k!} \right]^{-1} = \left[\frac{(\frac{16}{45})^2}{2(\frac{37}{45})} + \frac{16}{45} + 1 \right]^{-1} = \left[\frac{128}{1665} + \frac{16}{45} + 1 \right]^{-1}$$

$P_0 = \frac{37}{53} = 0.698113$

La probabilité d'attente est $\zeta_3 = \frac{(m_3 \rho_3)^{m_3}}{m_3!(1-\rho_3)} P_0 = \frac{128}{1665} \frac{37}{53}$. Ainsi : $\zeta_3 = \frac{128}{2385} = 0.0536687$ ← **0.25**

$\bar{Q}_3 = \frac{\zeta_3 \rho_3}{1-\rho_3} = \frac{\frac{128}{2385} \cdot \frac{8}{45}}{\frac{37}{45}} \Rightarrow \bar{Q}_3 = \frac{1024}{88245} = 0.011604056$ ← **0.25**

Ainsi : $\bar{Q}_{\text{réseau}} = \sum_{i=1}^3 \bar{Q}_i = 0 + \frac{4}{15} + \frac{1024}{88245} \Rightarrow \bar{Q}_{\text{réseau}} = 0.278271$ ← **0.25**

5. Nombre moyen de clients dans chaque file et dans le réseau :

Station 1 : $M/M/\infty$ $\bar{N}_1 = \frac{\lambda_1}{\mu_1} = \frac{6.4}{5} \Rightarrow \bar{N}_1 = \frac{32}{25} = 0.280000$. ← **0.25**

Station 2 : $M/M/1$ $\bar{N}_2 = \frac{\rho_2}{1-\rho_2}$. Donc $\bar{N}_2 = \frac{2}{3} = 0.666667$. ← **0.25**

Station 3 : $M/M/2$ $\bar{N}_3 = \bar{Q}_3 + \bar{R}_3$. Donc $\bar{N}_3 = \frac{1024}{88245} + \frac{8}{45} \Rightarrow \bar{N}_3 = 0.367160$. ← **0.25**

Ainsi, $\bar{N}_{\text{réseau}} = \bar{N}_1 + \bar{N}_2 + \bar{N}_3 = 1.280000 + 0.666667 + 0.367160$. Donc $\bar{N}_{\text{réseau}} = 2.313826$. ← **0.25**

6. Temps moyen de résidence

Le temps moyen de résidence dans une station est : $W_i = \frac{L_i}{\lambda_i}$.

Station 1 : $M/M/\infty$ $W_1 = \frac{1.280000}{6.400000} \Rightarrow \bar{T}_1 = 0.200000$. ← **0.25**

Station 2 : $M/M/1$ $W_2 = \frac{0.666667}{3.200000} \Rightarrow \bar{T}_2 = 0.208333$. ← **0.25**

Station 3 : $M/M/2$ $W_3 = \frac{0.367160}{2.133333} \Rightarrow \bar{T}_3 = 0.172106$ ← **0.25**

Pour le réseau, on utilise la loi de Little avec le taux d'arrivée externe $\gamma = 4$: $\bar{T}_{\text{réseau}} = \frac{\bar{N}_{\text{réseau}}}{\gamma}$.

Donc $\bar{T}_{\text{réseau}} = \frac{2.313826}{4} \Rightarrow \bar{T}_{\text{réseau}} = 0.578457$. ← **0.25**

7. Temps moyen d'attente

Le temps moyen d'attente dans une station est $\bar{W}_i = \frac{\bar{Q}_i}{\lambda_i}$.

Station 1 : $M/M/1$ $\bar{W}_1 = 0$ (pas d'attente) ← **0.25**

Station 2 : $M/M/1$ $\bar{W}_2 = \frac{0.266667}{3.200000} \Rightarrow \bar{W}_2 = 0.083333$ ← **0.25**

Station 3 : $M/M/2$ $\bar{W}_3 = \frac{0.011604}{2.133333} \Rightarrow \bar{W}_3 = 0.005439$ ← **0.25**

Pour le réseau : $\bar{W}_{\text{réseau}} = \frac{L_{q,\text{réseau}}}{\gamma}$. Donc $\bar{W}_{\text{réseau}} = \frac{0.278271}{4} \Rightarrow \bar{W}_{\text{réseau}} = 0.069568$. ← **0.25**

8. Probabilité que le réseau ne soit pas vide

Le réseau est vide si les trois stations sont vides simultanément.

Pour la station 1, qui est une file $M/M/\infty$, $P_0(1) = e^{-\frac{\lambda_1}{\mu_1}} = e^{-1.280000} \Rightarrow P_0(1) = 0.2780373$

Pour la station 2, qui est une file $M/M/1$, $P_0(2) = 1 - \rho_2 = 1 - 0.4 \Rightarrow P_0(2) = 0.600000$

Pour la station 3, on a déjà trouvé $P_0(3) = p_0 = \frac{37}{53} \Rightarrow P_0(3) = 0.698113$

Donc $P(\text{réseau vide}) = P_0(1)P_0(2)P_0(3)$. Ainsi, $P(\text{réseau vide}) = e^{-1.28} \times 0.6 \times 0.698113 = 0.116461$.

Par conséquent, $P(\text{réseau non vide}) = 1 - P(\text{réseau vide})$. Donc $P(\text{réseau non vide}) = 0.883539$. ← **0.5**