

centralelille

ÉCOLE CENTRALE DE LILLE



Production Industrielle

Guilherme ESPINDOLA-WINCK
Enseignant-Chercheur (MCF) à Centrale Lille et
au CRISTAL

Partie III : Simulation

3

Agenda

- Simulation de systèmes
 - Rappel statistique
 - Vérification et Validation de Modèle de Simulation
 - Interprétation des résultats de simulation
 - Mise en œuvre ARENA
 - Process Analyzer et OptQuest

4

Simulation de systèmes : rappel statistique

5

Rappel statistique

- Dans un système de production, de nombreux phénomènes sont aléatoires, tels que :
 - le temps de fonctionnement de l'opération manuelle,
 - la durée de vie de l'outil,
 - absence des opérateurs,
 - période d'arrivée des ordres de production pour commencer la production.
- Malgré les capacités des ordinateurs, il n'est pas réaliste de simuler toutes les déviations possibles dans de tels systèmes, ce qui fait des outils statistiques une alternative précieuse pour analyser et gérer les effets de ces variations aléatoires sur le comportement du système. La modélisation des systèmes aléatoires à événements discrets implique l'introduction d'imprévisibilité dans les événements à travers des moments d'occurrence d'événements aléatoires ou des transitions d'état d'événements aléatoires.
- La probabilité, permet de modéliser et d'étudier les phénomènes aléatoires, notamment les événements aléatoires, les variables aléatoires, les distributions de probabilité, etc.



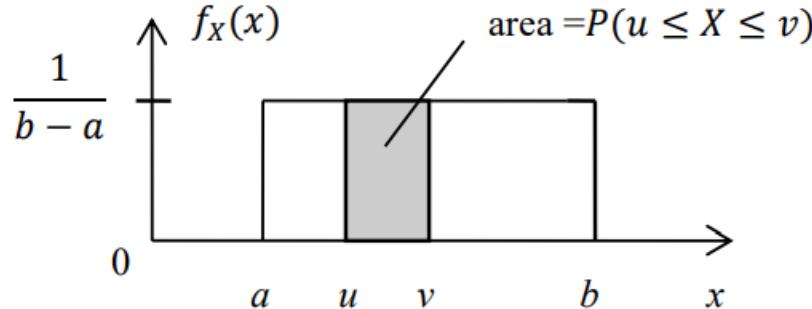
Rappel statistique

- La simulation utilise essentiellement les résultats de la probabilité et des statistiques pour
- s'approcher des données empiriques en utilisant des distributions de probabilité,
 - fonctions intégrées dans le modèle de simulation (distributions de probabilité),
- interpréter statistiquement les données générées par le modèle,
 - moyenne, écart-type, intervalle de confiance, etc.

7

Rappel statistique

- La moyenne M est un paramètre de position qui donne des informations sur l'ordre de grandeur des valeurs prises par la variable aléatoire X . La variance σ^2 est une mesure de la dispersion de ces valeurs par rapport à leur moyenne. Plus la variance est petite (≥ 0), plus les valeurs prises par X sont concentrées autour de la moyenne.
- Variables aléatoires :
 - Continues : uniforme $[a,b] \rightarrow$ aucune information sauf le support de la distribution (équiprobable)



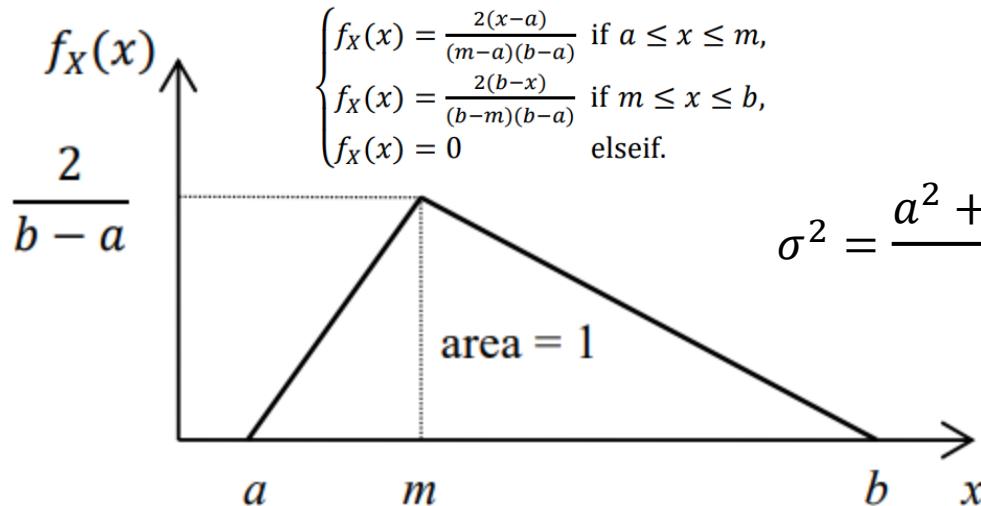
$$M = \frac{a + b}{2}$$

$$\sigma^2 = \frac{(b - a)^2}{12}$$

Rappel statistique

- Variables aléatoires :

- Continues : triangulaire $[a,b]$ → lorsque nous avons une estimation du minimum, du maximum et de la valeur la plus probable.
- Exercice : Soit $a=0$, $m=2$ et $b=3$, calculer $P(1 \leq X \leq 2.5)$



$$M = \frac{a + m + b}{3}$$

$$\sigma^2 = \frac{a^2 + m^2 + b^2 - am - ab - mb}{18}$$

9

Rappel statistique

a=0, m=2 et b=3

$$\forall m, n \in \mathbb{R}, P(m \leq X \leq n) = \int_m^n f_X(x) dx$$

$$\begin{cases} f_X(x) = \frac{2(x-a)}{(m-a)(b-a)} & \text{if } a \leq x \leq m, \\ f_X(x) = \frac{2(b-x)}{(b-m)(b-a)} & \text{if } m \leq x \leq b, \\ f_X(x) = 0 & \text{elseif.} \end{cases}$$

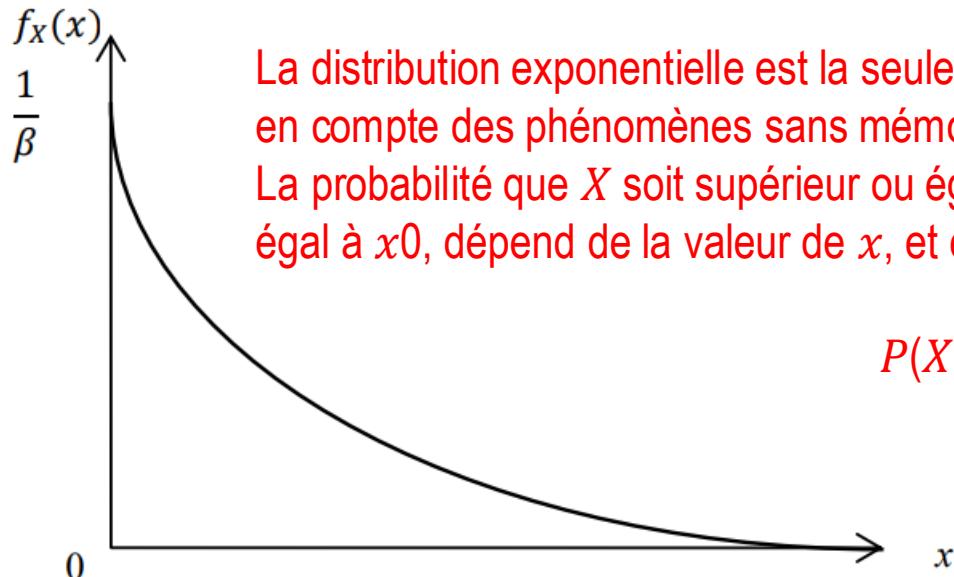
$$\begin{aligned} P(1 \leq X \leq 2.5) &= \int_1^{2.5} f_X(x) dx = \\ &= \int_1^2 \frac{2(x-a)}{(m-a)(b-a)} dx + \int_2^{2.5} \frac{2(b-x)}{(b-m)(b-a)} dx = 0.75 \end{aligned}$$

10



Rappel statistique

- Variables aléatoires :
 - Continues : exponentielle $[0, +\infty)$ → très utilisée en pratique. Par exemple : dans le cas de la période de temps entre les arrivées de 2 « clients » successifs (files d'attente)



La distribution exponentielle est la seule distribution continue qui permet de prendre en compte des phénomènes sans mémoire.

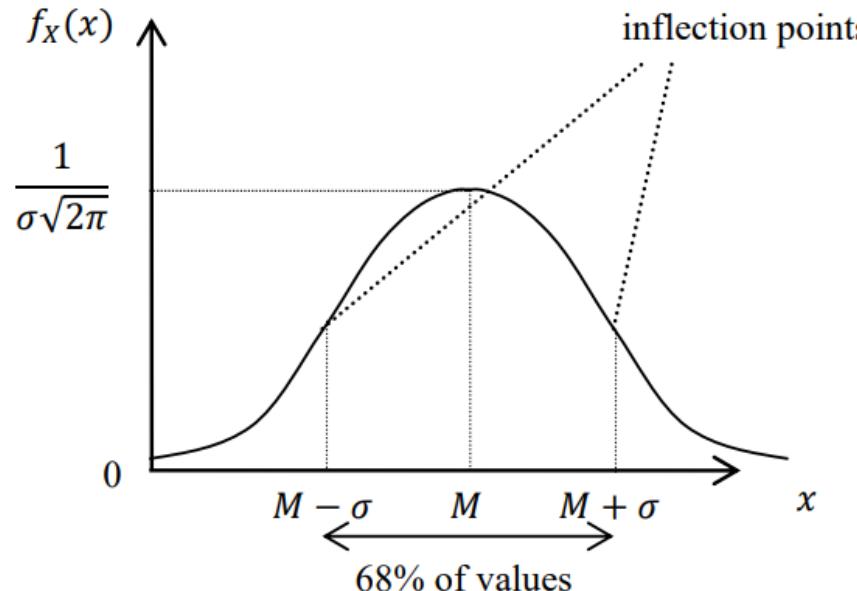
La probabilité que X soit supérieur ou égal à $x + x_0$, sachant que X est supérieur ou égal à x_0 , dépend de la valeur de x , et est indépendante de la valeur de x_0 :

$$P(X \geq x + x_0 | X \geq x_0) = P(X \geq x).$$

$$\begin{aligned}M &= \beta \\ \sigma^2 &= \beta^2\end{aligned}$$

Rappel statistique

- Variables aléatoires :
 - Continues : normale $(-\infty, +\infty)$ → utile pour caractériser des systèmes symétriques avec des estimations de moyenne et d'écart-type, ainsi que pour la modélisation de données qui sont le résultat de l'agrégation de nombreuses données aléatoires.



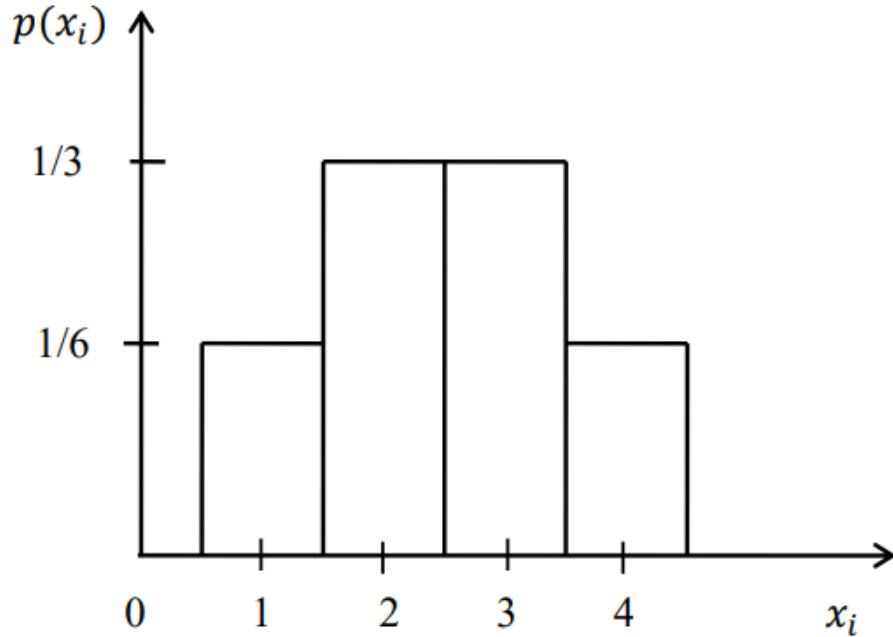
$$f_x(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-(x-M)^2/2\sigma^2}$$

$$\begin{aligned}M &= M \\ \sigma^2 &= \sigma^2\end{aligned}$$

12

Rappel statistique

- Variables discrètes : histogramme → le cas de l'injection directe de données empiriques dans un modèle (par exemple : le type de pièces de travail, la taille des lots)



$$p_c(x_1) = \frac{1}{6}, \quad p_c(x_2) = \frac{1}{2}, \quad p_c(x_3) = \frac{5}{6}, \quad p_c(x_4) = 1$$

$$M = \sum_{i=1}^N x_i p(x_i)$$

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^N (x_i - M)^2 p(x_i)$$

Probabilité cumulative

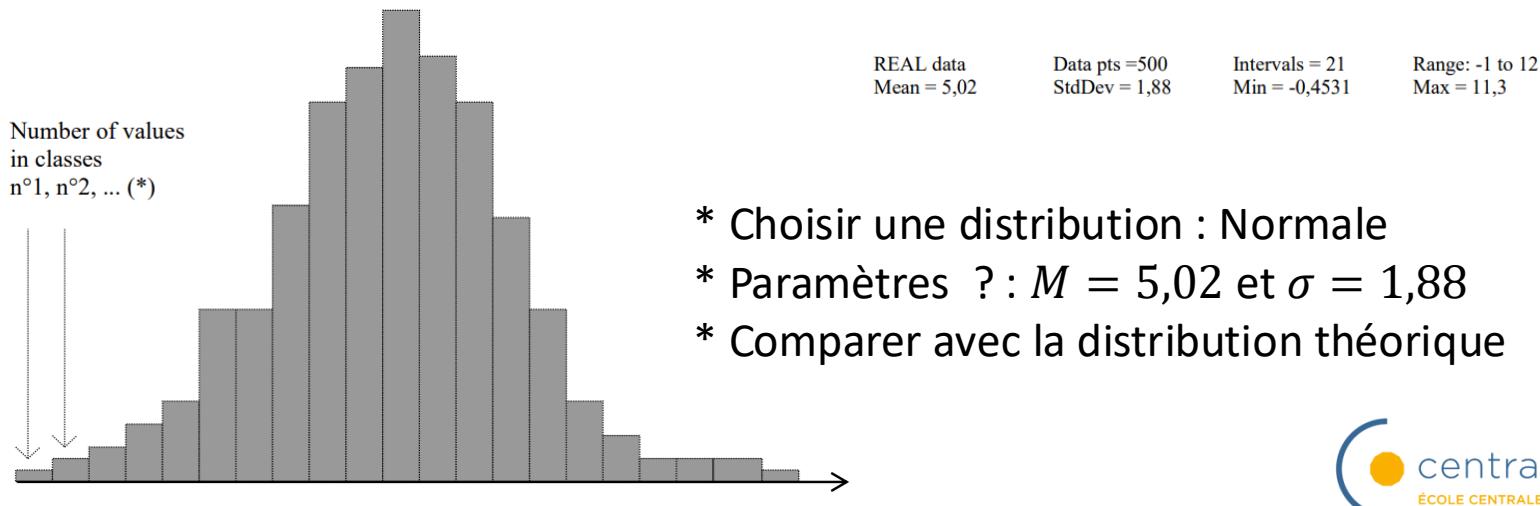
$$p_c(x_i) = \sum_{l=1}^i p(x_l)$$

Rappel statistique

- Sources de données : Système de production → cela peut concerner les temps inter-arrivées des pièces de travail, les temps de traitement, les temps de déplacement, les taux de rebut, les taux de demande, etc.
- 2 problèmes :
 - La collecte de données : quelles données ? Sont disponibles ? Sont nécessaires ? Comment les obtenir ?
 - Systèmes stochastiques : lire directement une base de données « empirique » ou utiliser une distribution « théorique » ?
- D'où viennent les données ?
 - Datasets (à demander) : problème de mise à jour
 - Observation : RH (erreurs, négligence des valeurs extrêmes et oubli du passé),
 - Systèmes similaires : faire attention aux inférences,
 - Informations fournies par le vendeur/concepteur (souvent optimistes).

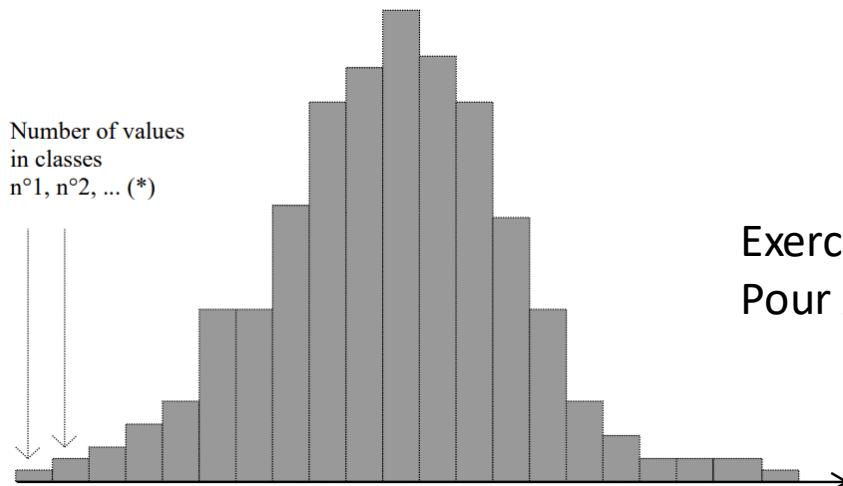
Rappel statistique

- Les données sont : disponibles ou partiellement connues
- Disponibles :
 - Exemple : Temps de production d'une machine – nb d'observations 500
 - Mesurés en utilisant un chronomètre
 - Nb de classes (groupes d'observations) = $O(\sqrt{nb\ observations})$
 - Supposons 21 classes de même longueur



Rappel statistique

- Les données sont : disponibles ou partiellement connues
- Disponibles :
 - Exemple : Temps de production d'une machine – nb d'observations 500
 - Mesurés en utilisant un chronomètre
 - Nb de classes (groupes d'observations) = $O(\sqrt{nb\ observations})$
 - Supposons 21 classes de même longueur



REAL data
Mean = 5,02

Data pts = 500
StdDev = 1,88

Intervals = 21
Min = -0,4531

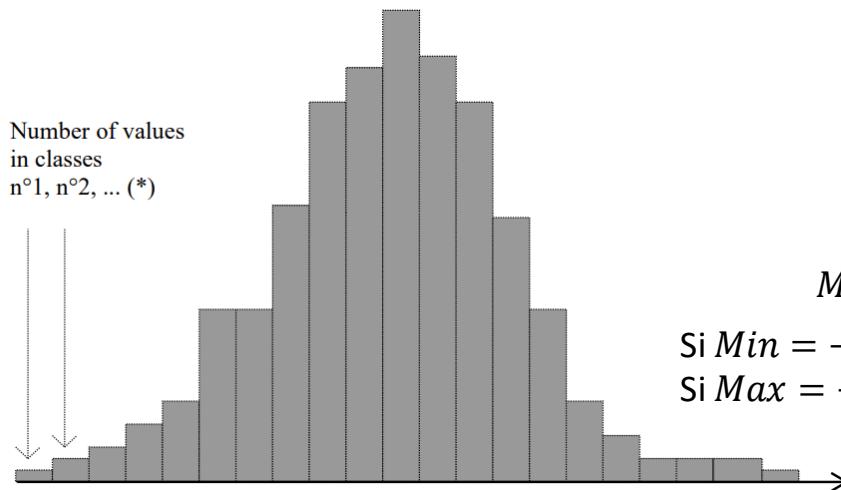
Range: -1 to 12
Max = 11,3

NORMAL DISTRIBUTION: NORM(5,02; 1,88)
Sq Error = 0,0008231

Exercice : Donner les valeurs de lb et ub
Pour $x \in Classe_n, 1 \leq n \leq 21 \Leftrightarrow lb \leq x \leq ub$

Rappel statistique

- Les données sont : disponibles ou partiellement connues
- Disponibles :
 - Exemple : Temps de production d'une machine – nb d'observations 500
 - Mesurés en utilisant un chronomètre
 - Nb de classes (groupes d'observations) = $O(\sqrt{nb\ observations})$
 - Supposons 21 classes de même longueur



REAL data
Mean = 5,02 Data pts = 500
StdDev = 1,88 Intervals = 21
Range: -1 to 12
Min = -0,4531 Max = 11,3

NORMAL DISTRIBUTION: NORM(5,02; 1,88)
Sq Error = 0,0008231

$$x \in Classe_n, 1 \leq n \leq 21 \Leftrightarrow Min + (n - 1) \frac{Max - Min}{21} \leq x \leq Min + n \frac{Max - Min}{21}$$

Si $Min = -\infty$ donc il existe une classe $(-\infty, a]$

Si $Max = +\infty$ donc il existe une classe $[a, +\infty)$

Rappel statistique

- Les données sont : disponibles ou partiellement connues
- Partiellement connues (on n'a pas les données et donc on utilise des « estimations »)
 - On connaît que la moyenne M :
 - $\sigma \uparrow$: la variable est définie comme une constante = M
 - $\sigma \downarrow$: distribution exponentielle avec M si la nature du processus permet
 - On connaît que Min et Max :
 - « Valeurs » avec même probabilité : distribution uniforme
 - Les données sont centrées autour de $\frac{Min+Max}{2}$: distribution normale :
 - Taille des données conséquente $\rightarrow \sigma = \frac{Max-Min}{6}$
 - Sinon $\rightarrow \sigma = \frac{Max-Min}{4}$
 - On connaît Min, Max et M : distribution triangulaire



Vérification et validation de modèle

- Les modèles de simulation peuvent évoluer de manière significative au cours de leur développement.
 - Comment faire confiance au modèle ?
 - Comment le transmettre à l'utilisateur ?
 - Avant d'analyser le modèle (inférences des résultats statistiques), il est nécessaire de s'assurer qu'il représente bien le système
 - vérification et la validation



Vérification et validation de modèle

- Vérification :

- Conseil général : commencer par un modèle simple et progressivement augmenter sa complexité

- Le modèle doit se comporter comme prévu : il faut détecter et isoler les erreurs

- Conseils :

- 1. Hypothèse : il existe des erreurs

- 2. Tests :

- Remplacer les temps aléatoires par des constantes

- tests modulaires

- Conditions extrêmes :

- Augmenter le taux d'arrivée pour créer une congestion

- Réduire la taille des stocks pour créer des phénomènes de saturation,

- Modifier la distribution des types de pièces pour augmenter l'arrivée de pièces de types moins fréquents.

- augmenter le taux d'occurrence des pannes (moins fréquent)

20

Vérification et validation de modèle

- Vérification :
 - Conseil général : commencer par un modèle simple et progressivement augmenter sa complexité
 - Le modèle doit se comporter comme prévu : il faut détecter et isoler les erreurs
 - Conseils :
 4. Utiliser une animation
 5. Corriger les erreurs en identifiant les causes réelles et ne pas se contenter de traiter les symptômes (le raisonnement logique reste la meilleure approche).
 6. Évitez les erreurs classiques, notamment en ce qui concerne
 - l'acquisition des données d'entrée (unités de mesure)
 - L'initialisation du modèle de simulation,
 - les erreurs arithmétiques (parenthèses, conversion de type, etc.)

Vérification et validation de modèle

- Validation :
 - Le modèle représente-t-il correctement le système de production ?
 - Les données comportementales générées par le modèle sont-elles caractéristiques du système ?
 - L'utilisateur a-t-il confiance dans les résultats du modèle ?
 - Tests :
 1. Le comportement est-il raisonnable ?
 - Continuité : $u_j + \delta u_j$ implique $x_k + \delta x_k$ et $y_i + \delta y_i$ avec un petit δu_j
 - Cohérence : Exécutions presque identiques, par exemple lorsque le générateur aléatoire est modifié → résultats presque identiques.
 - Suppression d'un composant du modèle : Exemple : une machine est supprimée → effets sur les résultats
 - Conditions extrêmes : par exemple, un budget infini ne doit pas conduire à des ventes infinies

22

Vérification et validation de modèle

- Validation :
 - Le modèle représente-t-il correctement le système de production ?
 - Les données comportementales générées par le modèle sont-elles caractéristiques du système ?
 - L'utilisateur a-t-il confiance dans les résultats du modèle ?
 - Tests :
 2. Les théories et les hypothèses doivent être correctes et la représentation du modèle doit être adaptée à l'utilisation souhaitée.
 - Le comportement semble correct pour les utilisateurs familiarisés avec le système de production (logique, entrées-sorties)
 - Vérification de la structure et des limites : Correspondance entre le modèle conceptuel et le système de référence

23

Vérification et validation de modèle

- Validation :
 - Le modèle représente-t-il correctement le système de production ?
 - Les données comportementales générées par le modèle sont-elles caractéristiques du système ?
 - L'utilisateur a-t-il confiance dans les résultats du modèle ?
 - Tests :
 3. Etudier le comportement du modèle par rapport au système de référence
 - Tests statistiques pour comparer les résultats (Khi-deux, Kolmogorov-Smirnov, etc.).
 - Le modèle génère-t-il des difficultés déjà connues dans le système ?
 - Le modèle produit-il des résultats connus pour des entrées données ?
 - Anomalie de comportement : une anomalie dans le modèle peut-elle conduire à la découverte d'une anomalie équivalente dans le système (réel) ?
 - Prédiction du comportement : modèle vs tests du système.

24

Interprétation des résultats de simulation

- La simulation peut générer :
 - un rapport comprenant les moyennes, les écarts-types, les minimums et les maximums des variables observées, des variables observées, etc. (un historique de l'évolution de ces variables au cours de la simulation)
 - La qualité de la moyenne en tant qu'estimateur de la vraie moyenne dépend, entre autres, du nombre d'observations. De même, l'écart-type est biaisé pour un petit nombre d'observations.
 - Le rapport n'est pas suffisant pour tirer des conclusions crédibles sur les performances du système : il suffit de changer le générateur de nombres aléatoires, sans changer le modèle, pour obtenir des résultats différents.
- Une animation graphique n'est pas non plus suffisante.

Interprétation des résultats de simulation

- Les résultats agissent comme des mesures sur un échantillon. Ils doivent donc être utilisés pour effectuer des procédures statistiques. Chaque variable (inconnue) doit être associée à un intervalle de confiance.
 - L'intervalle de confiance $IC = [c_1, c_2]$ du paramètre inconnu λ est défini par 2 valeurs statistiques c_1, c_2 de sorte qu'il couvre la vraie valeur de λ avec une probabilité donnée $1 - \alpha$:

$$p(\lambda \in IC) = 1 - \alpha$$

- La probabilité $1 - \alpha$, associée à l'estimation de cet intervalle, est appelée niveau de confiance ou seuil de confiance ("confidence threshold"). Les valeurs les plus couramment utilisées sont 0,9 ; 0,95 ; 0,99 et 0,999.

Interprétation des résultats de simulation

- Chaque réalisation des deux statistiques c_1, c_2 fournit un intervalle de confiance numérique IC.
- Ainsi, la notion de niveau de confiance doit être interprétée comme suit :
 - si nous effectuons un grand nombre de réalisations des deux statistiques c_1, c_2 , la valeur inconnue λ sera couverte par environ $100.(1 - \alpha)\%$
- La longueur d'un IC diminue par :
 - L'augmentation de la taille de l'échantillon,
 - en réduisant la dispersion de λ ,
 - en choisissant un niveau de confiance plus faible, par exemple en prenant 0,9 au lieu de 0,95.
 - Dans ARENA (lorsque le nombre de réplications est supérieur à 1), la demi-largeur correspond à un intervalle de confiance dont le seuil est égal à 95%.



Interprétation des résultats de simulation

- La moyenne d'un échantillon de taille n extrait d'une population de moyenne μ et d'écart-type σ est distribuée selon une distribution pratiquement normale de la moyenne μ et de l'écart-type $\frac{\sigma}{\sqrt{n}}$ lorsque la taille de l'échantillon est suffisamment grande.
 - Pour une population issue d'une distribution normale, le théorème de la limite centrale est valable pour tous les n .
 - Pour d'autres distributions, plus la taille de l'échantillon est grande, plus la distribution est proche de la distribution normale. On peut considérer qu'à partir d'un n égal à 30, la moyenne d'un échantillon est distribuée de façon sensiblement normale.
- Exemple :
 - $\bar{X} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n}$ donc $\bar{X} \sim N(M, \frac{\sigma}{\sqrt{n}})$
 - Pour rendre \bar{X} distribué avec moyenne 0 et écart-type 1 :

$$Z = \frac{\bar{X} - M}{\frac{\sigma}{\sqrt{n}}} \text{ et } Z \sim N(0,1) \rightarrow \text{distribution normale standard}$$

Interprétation des résultats de simulation

$$f_X(x) = \frac{e^{-\frac{x^2}{2}}}{\sqrt{2\pi}}$$

- $P(Z \leq z_{1-\frac{\alpha}{2}}) = 1 - \frac{\alpha}{2}$ et $P(-z_{1-\frac{\alpha}{2}} \leq Z \leq z_{1-\frac{\alpha}{2}}) = 1 - \alpha$
 - $P\left(-z_{1-\frac{\alpha}{2}} \leq \frac{\bar{X} - M}{\frac{\sigma}{\sqrt{n}}} \leq z_{1-\frac{\alpha}{2}}\right) = 1 - \alpha \rightarrow \text{ou } \int_{-z_{1-\frac{\alpha}{2}}}^{z_{1-\frac{\alpha}{2}}} f_X(x) dx = 1 - \alpha \text{ ou}$ $\int_{-\infty}^{z_{1-\frac{\alpha}{2}}} f_X(x) dx = 1 - \frac{\alpha}{2}$
 - $P\left(\bar{X} - z_{1-\frac{\alpha}{2}} \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \leq M \leq \bar{X} + z_{1-\frac{\alpha}{2}} \frac{\sigma}{\sqrt{n}}\right) = 1 - \alpha$
 - Donc $IC = [\bar{X} - z_{1-\frac{\alpha}{2}} \frac{\sigma}{\sqrt{n}}, \bar{X} + z_{1-\frac{\alpha}{2}} \frac{\sigma}{\sqrt{n}}]$ est un intervalle de $100.(1 - \alpha)\%$ de confiance
- Exercice :
 - la durée de vie d'un composant électrique suit une loi normale de moyenne M inconnue et d'écart-type $\sigma = 20u.t.$.
 - Une étude sur un échantillon de taille $n = 16$ donne une durée de vie moyenne de 3000 u.t.
 - Déterminer l'IC pour M avec $\alpha = 0.05$



Interprétation des résultats de simulation

- $z_{1-\frac{\alpha}{2}} = z_{0.975} = 1.96, n = 16, \sigma = 20, \bar{X} = 3000$
- $IC = \left[\bar{X} - z_{1-\frac{\alpha}{2}} \frac{\sigma}{\sqrt{n}}, \bar{X} + z_{1-\frac{\alpha}{2}} \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \right] =$
- $IC = [3000 - 1.96 * \frac{20}{\sqrt{16}}, 3000 + 1.96 * \frac{20}{\sqrt{16}}]$
- IC=[2990.2, 3009.8] avec 95% de confiance



Interprétation des résultats de simulation

- 2 types de systèmes :
 - Les systèmes finis, c'est-à-dire ceux ayant un événement final déterminant la fin de la simulation, par exemple, un magasin qui ouvre et ferme à intervalles réguliers
 - Ils offrent une analyse plus simple, permettant un contrôle sur le nombre de répétitions dans le modèle de simulation. Deux types de données sont collectés :
 - a) les observations individuelles à chaque itération, comme le temps de traitement de chaque élément, et
 - b) les moyennes, écarts-types, maximums et minimums des observations à chaque itération, par exemple, le temps moyen de traitement.
 - Si le générateur de nombres aléatoires change à chaque répétition, les observations de type b) peuvent être considérées comme indépendantes et distribuées normalement, facilitant l'application de procédures statistiques pour les moyennes. Cela permet de calculer des intervalles de confiance pour les moyennes, maximums et minimums, ainsi que des intervalles de confiance pour les différences entre les systèmes. Cette comparaison est utile pour évaluer des différences entre dimensionnements ou règles d'ordonnancement.

Interprétation des résultats de simulation

- 2 types de systèmes :
 - Les systèmes finis, c'est-à-dire ceux ayant un événement final déterminant la fin de la simulation, par exemple, un magasin qui ouvre et ferme à intervalles réguliers
 - La procédure générale implique de simuler un nombre important de répétitions, analyser le comportement du système en se basant sur les moyennes, ajuster le nombre de répétitions en fonction des précisions souhaitées pour l'intervalle de confiance, et répéter le processus d'analyse.

32



Interprétation des résultats de simulation

- 2 types de systèmes :
 - Les systèmes non terminaux, c'est-à-dire ceux qui n'ont pas d'événement final dans la simulation, par exemple, un hôpital où il y a toujours au moins un patient.
 - L'étude des performances stables d'un système se concentre sur la phase transitoire, souvent favorable aux performances, comme l'atelier vide en début de simulation. L'état stable, indépendant de l'état initial, vise à calculer un intervalle de confiance pour la moyenne. Deux problèmes surgissent : l'absence de transition précise entre les phases et la corrélation entre observations.
 - Trois approches abordent le problème transitoire :
 - reproduire des conditions proches de la stabilité,
 - des simulations longues pour minimiser l'effet transitoire, ou exclure ces données, notamment via la moyenne glissante.
 - L'exclusion visuelle est courante, bien que sans méthode standardisée.

Interprétation des résultats de simulation

- 2 types de systèmes :
 - Les systèmes non terminaux, c'est-à-dire ceux qui n'ont pas d'événement final dans la simulation, par exemple, un hôpital où il y a toujours au moins un patient.
 - Pour les intervalles de confiance, deux approches dominent : répétitions indépendantes ou simulation longue avec subdivision en lots. Cette dernière implique l'exclusion du transitoire, la division des observations en n lots de taille m , remplaçant chaque lot par sa moyenne pour calculer l'intervalle.
 - Les indications suggèrent $n = 10$ lag*, m entre 10 et 20, où "lag*" est la plus grande série corrélée. Cette méthode s'applique à des variables non-dépendantes du temps et s'ajuste pour des variables persistantes, en adaptant la subdivision à des intervalles de temps réguliers.

Simulation de systèmes : Logiciels

35

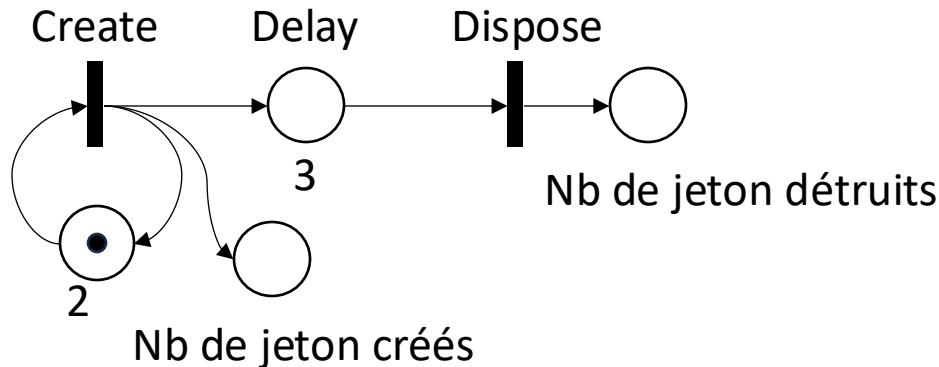
Simulation numérique

- ARENA version étudiante (Windows uniquement) :
 - https://highered.mheducation.com/sites/0073401315/student_view0/arena_software_download.html

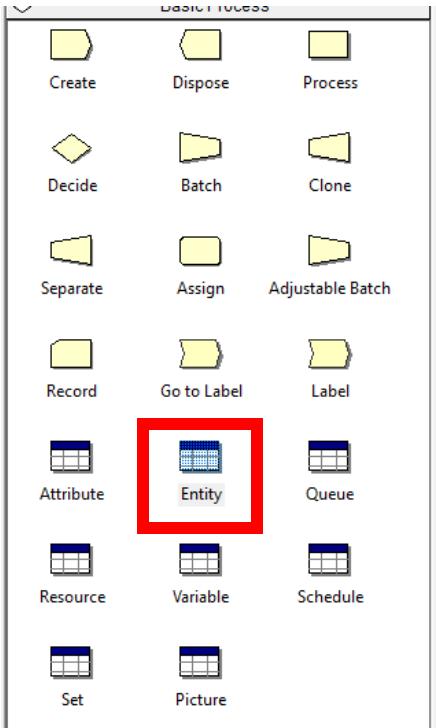


Simulation numérique

- ARENA
 - FlexSim ou « from scratch » en Python, Java, Matlab, etc...
- Blocs « Create » et « Dispose » de Basic Process
- Bloc « Delay » de Advanced Process
 - Faire le RdP suivant :



Simulation numérique



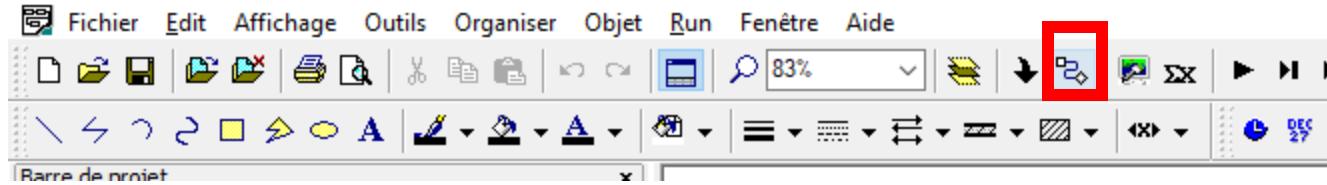
Entity

Entity - Basic Process								
	Entity Type	Initial Picture	Holding Cost / Hour	Initial VA Cost	Initial NVA Cost	Initial Waiting Cost	Initial Tran Cost	Initial Other Cost
1 ►	Token	Picture.Yellow Page	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	<input checked="" type="checkbox"/>
Double-cliquer ici pour ajouter une nouvelle ligne								

38



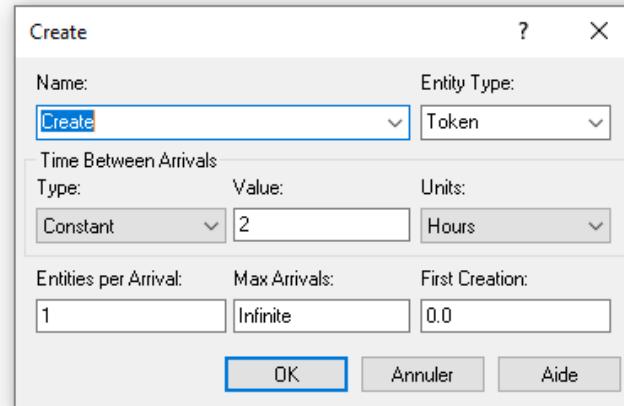
Simulation numérique



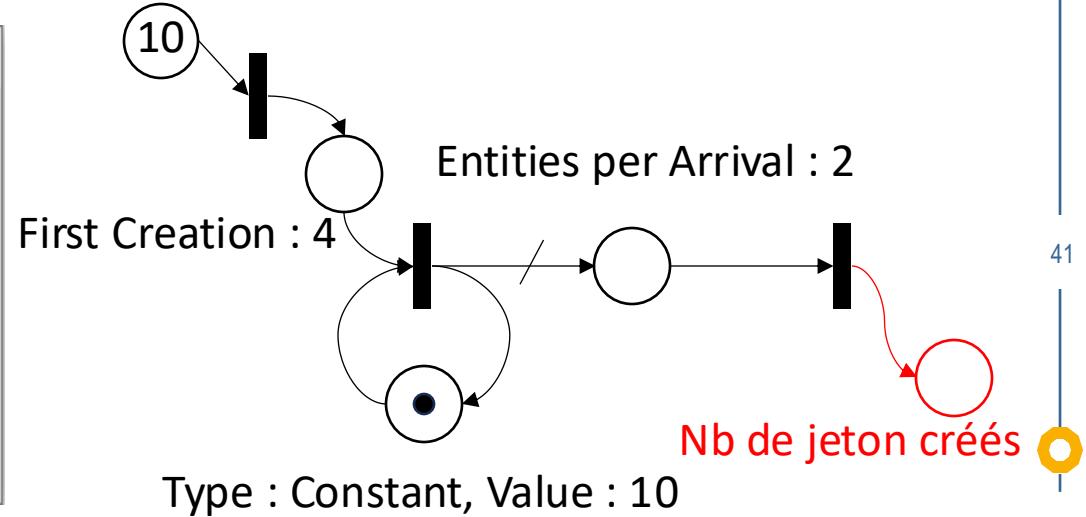
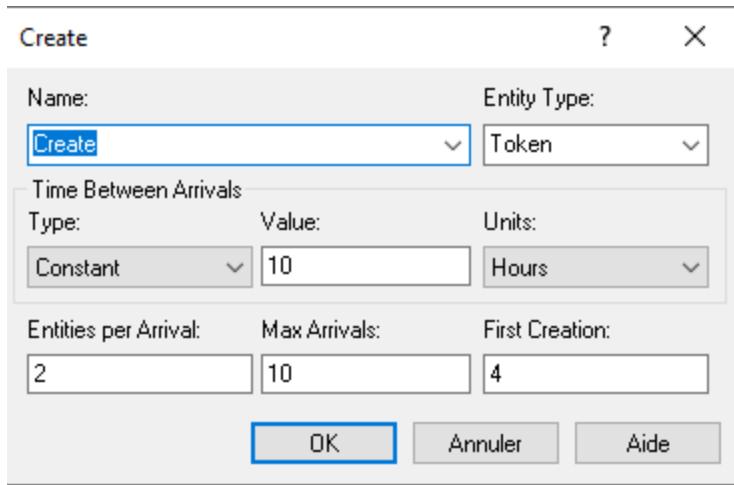
39



Simulation numérique

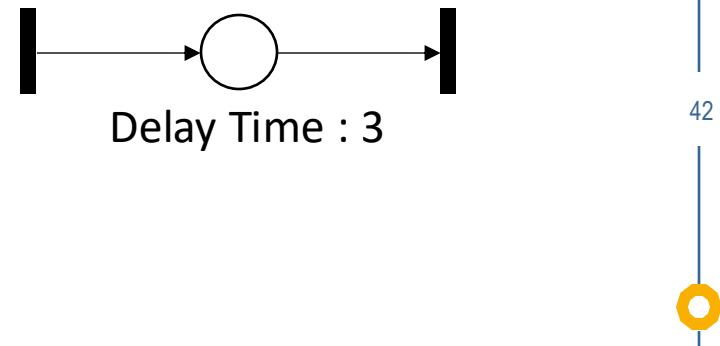
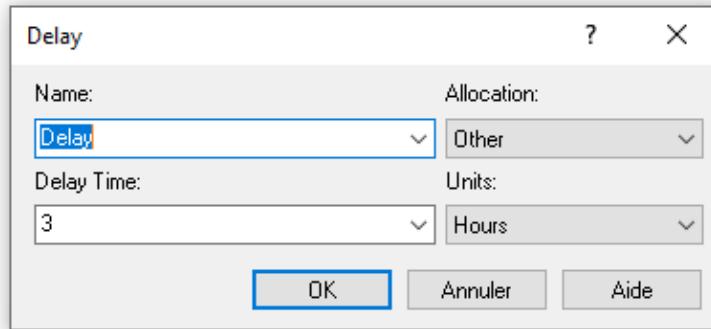


Simulation numérique

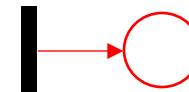
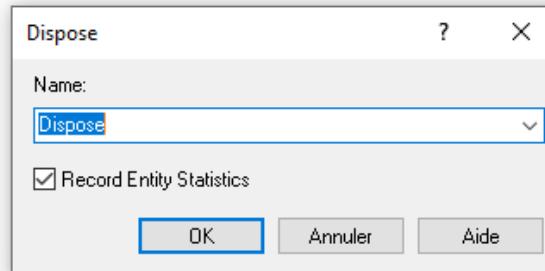


Deux entités sont créées 10 fois à chaque 10 heures à partir de 4.

Simulation numérique



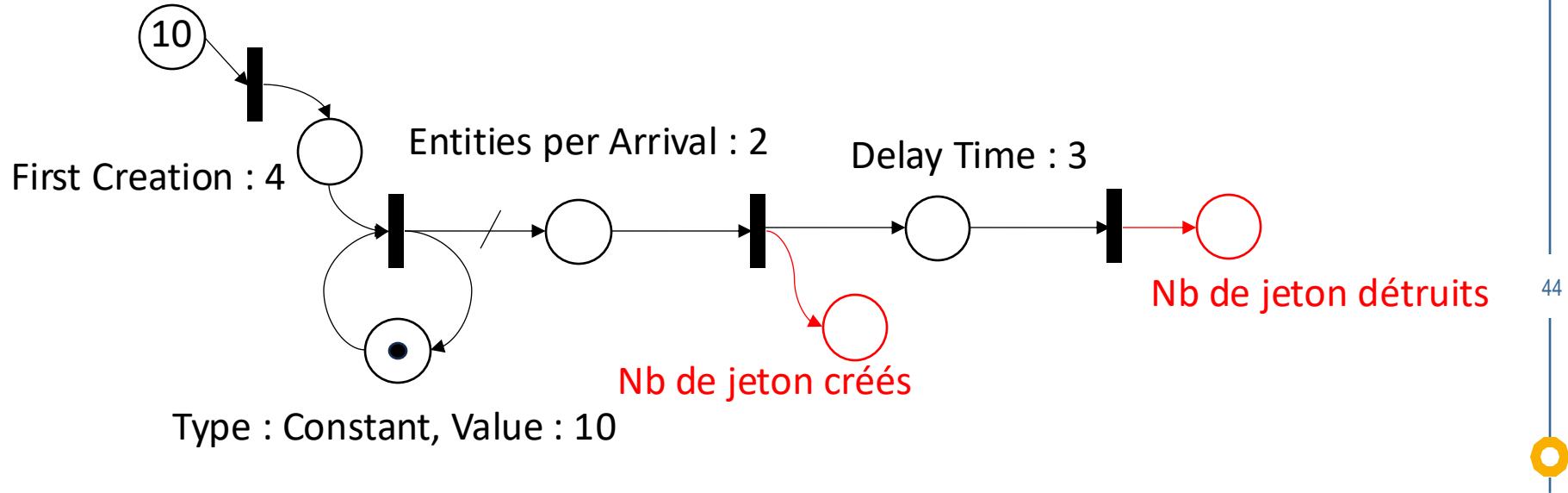
Simulation numérique



Nb de jeton détruits

43

Simulation numérique



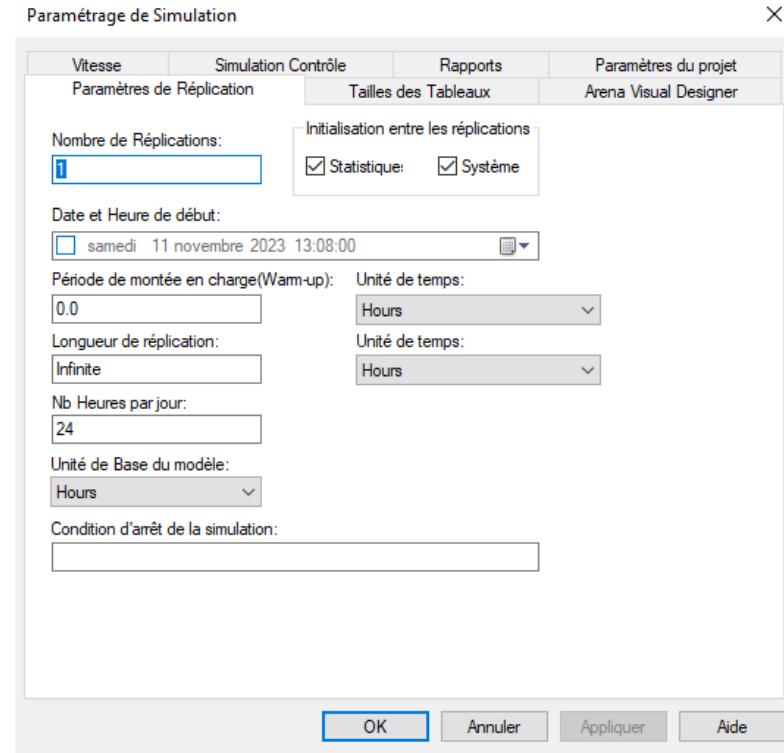
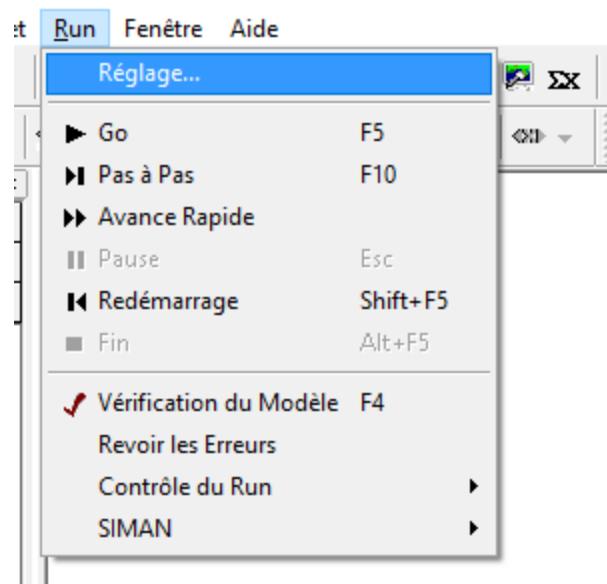
Simulation numérique



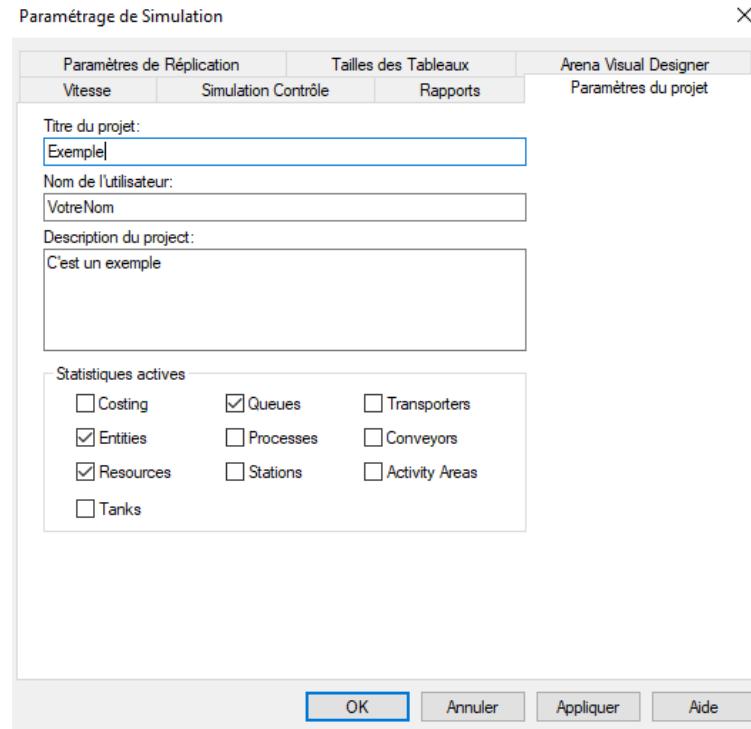
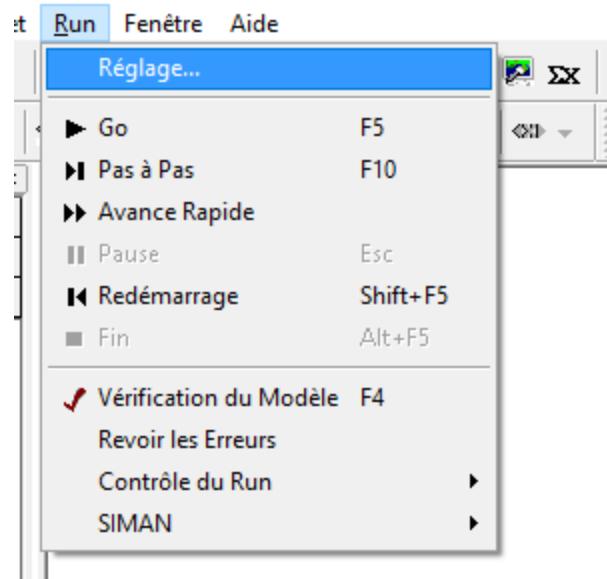
45



Simulation numérique

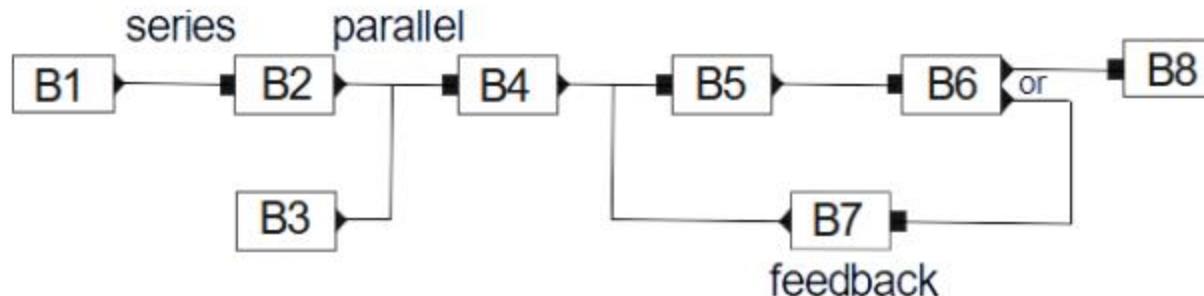


Simulation numérique



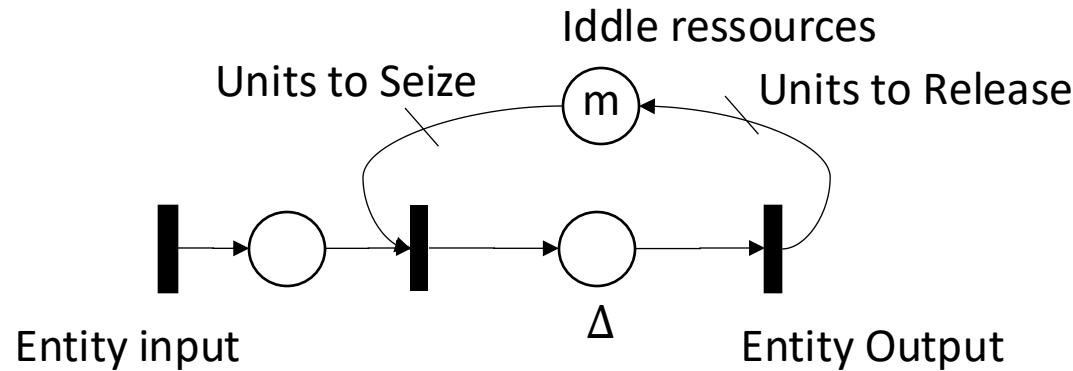
Simulation numérique

Les blocs du schéma bloc sont reliés en série, en parallèle, ou en rétroaction par des connecteurs. Un connecteur transfère une entité en temps nul depuis le point de sortie d'un bloc (graphiquement représenté par une petite flèche) vers le point d'entrée du bloc suivant (représenté par un petit rectangle).

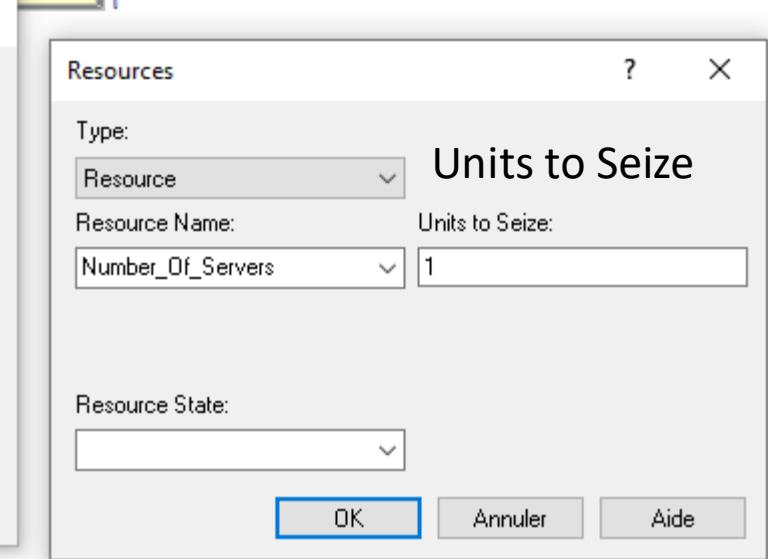
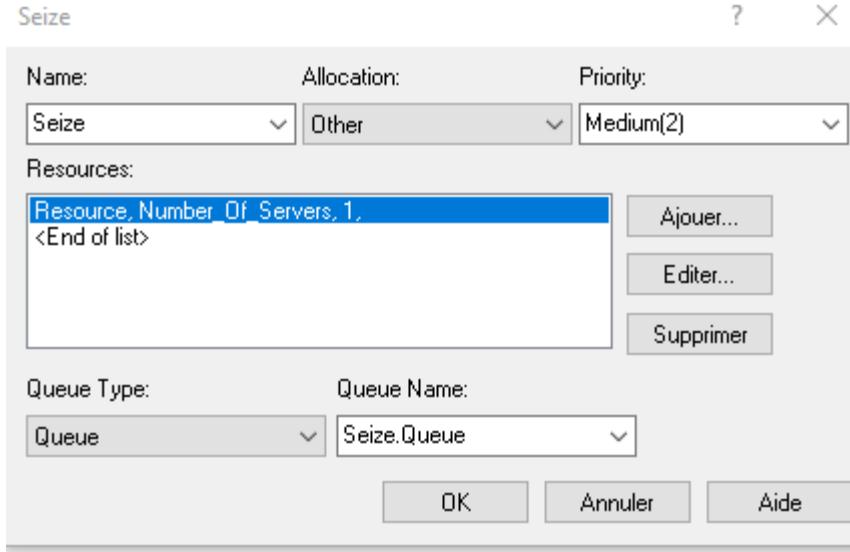


Simulation numérique

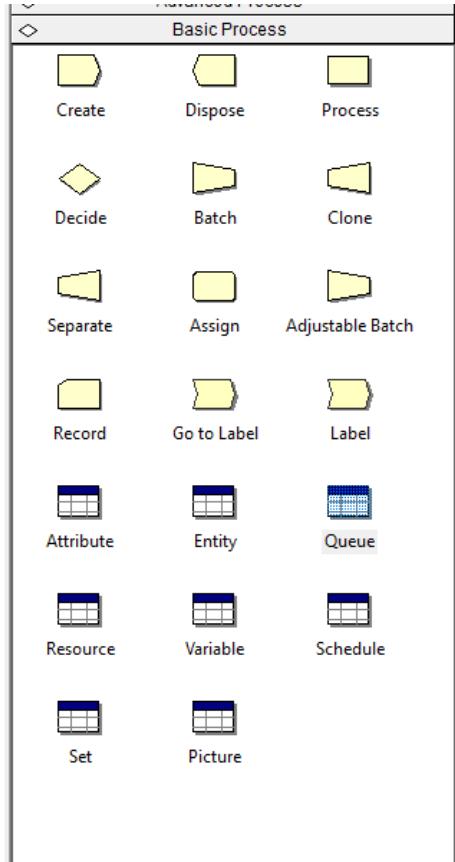
Blocs « Seize » et « Release » de Advanced Process



Simulation numérique



Simulation numérique



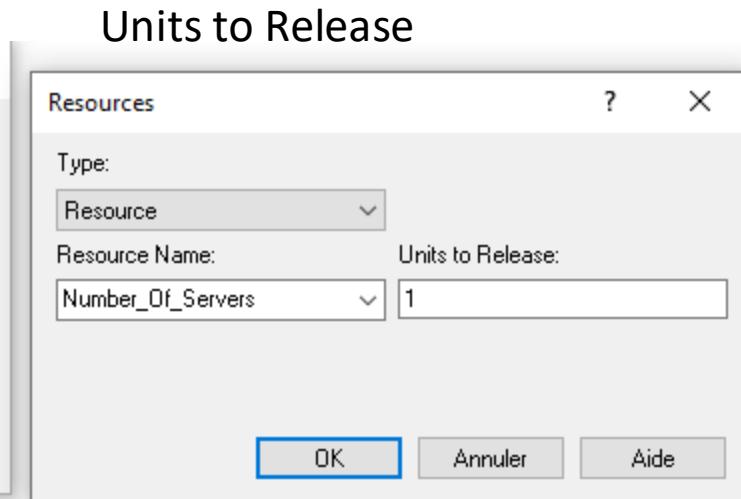
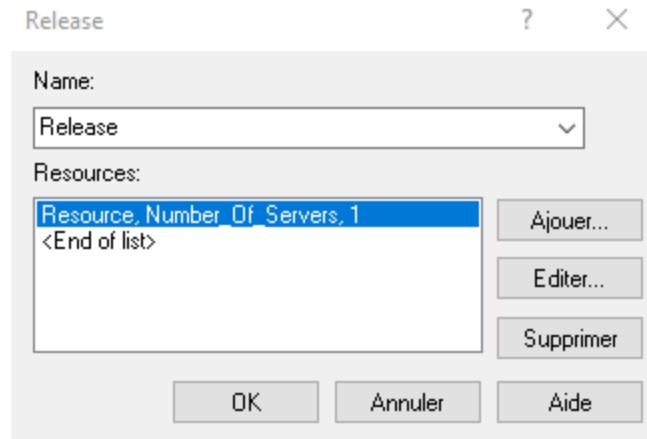
Entity - Basic Process								
	Entity Type	Initial Picture	Holding Cost / Hour	Initial VA Cost	Initial NVA Cost	Initial Waiting Cost	Initial Tran Cost	Initial Other Cost
1 ►	Client	Picture.Yellow Page	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	<input checked="" type="checkbox"/>
Double-cliquer ici pour ajouter une nouvelle ligne								

Queue - Basic Process				
	Name	Type	Shared	Report Statistics
1 ►	Seize.Queue	First In First Out	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Double-cliquer ici pour ajouter une nouvelle ligne				

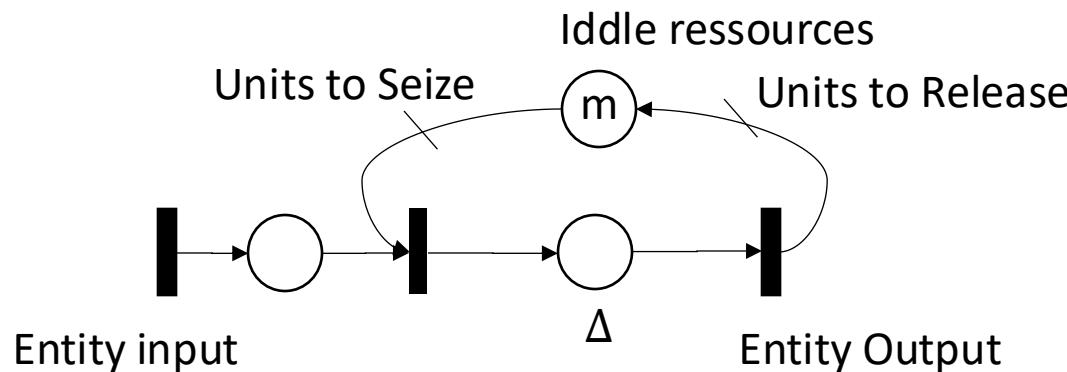
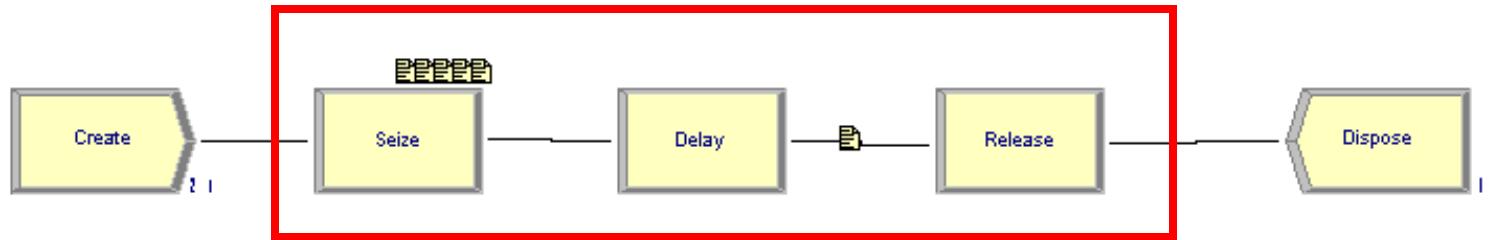
Idle ressources

Resource - Basic Process								
	Name	Type	Capacity	Busy / Hour	Idle / Hour	Per Use	StateSet Name	Failures
1 ►	Number_Of_Servers	Fixed Capacity	3	0.0	0.0	0.0	0 rows	<input checked="" type="checkbox"/>
Double-cliquer ici pour ajouter une nouvelle ligne								

Simulation numérique

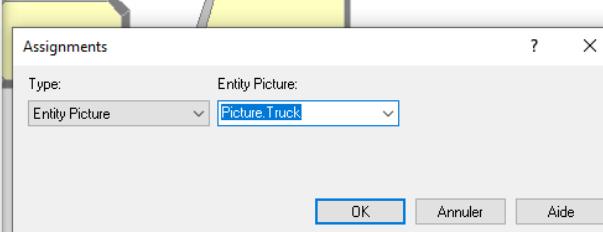
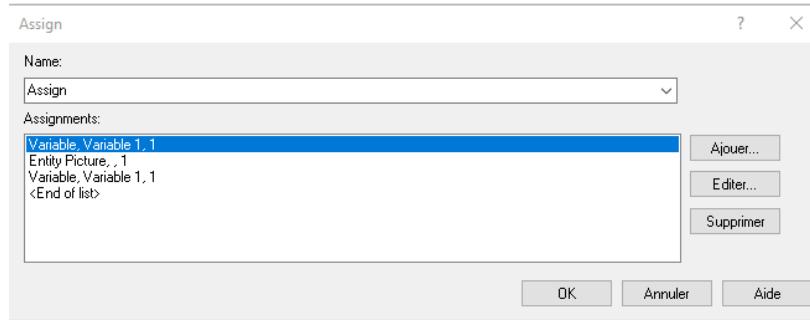
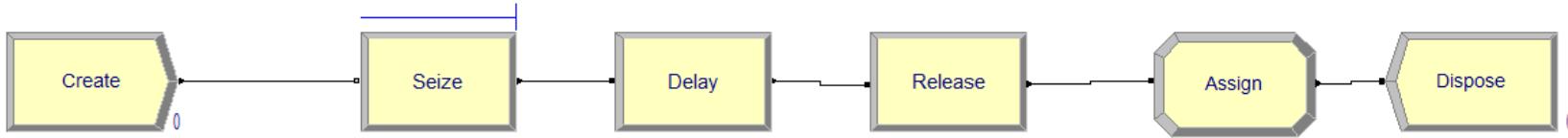


Simulation numérique



Simulation numérique

Bloc « Assign » de Basic Process

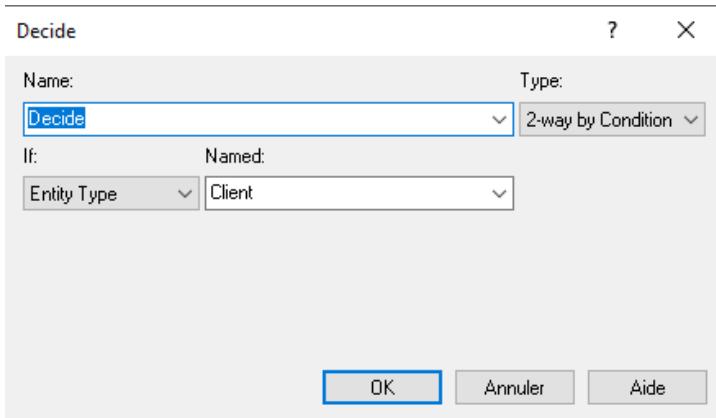
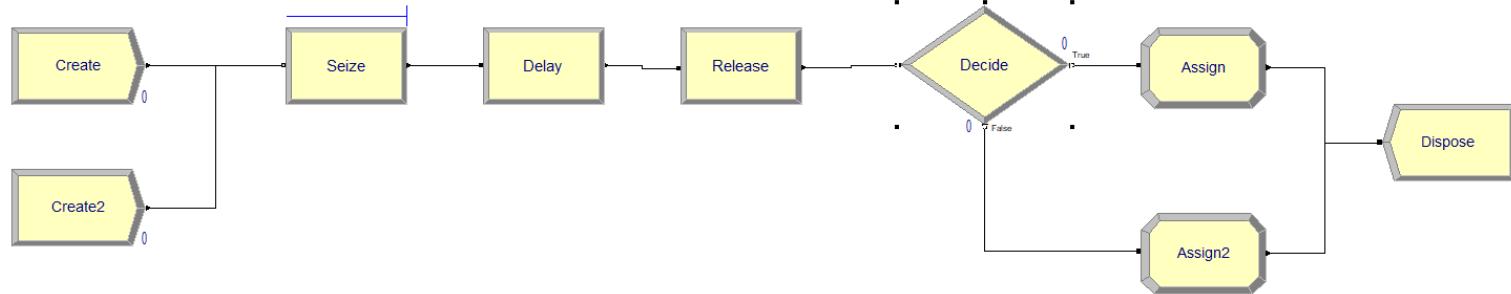


Variable - Basic Process								
	Name	Comment	Rows	Columns	Data Type	Clear Option	File Name	Initial Values
1 ►	Variable 1				Real	System		0 rows <input checked="" type="checkbox"/>

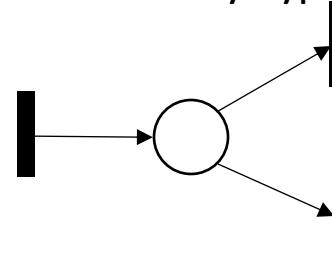
Double-cliquer ici pour ajouter une nouvelle ligne

Simulation numérique

Bloc « Decide » de Basic Process



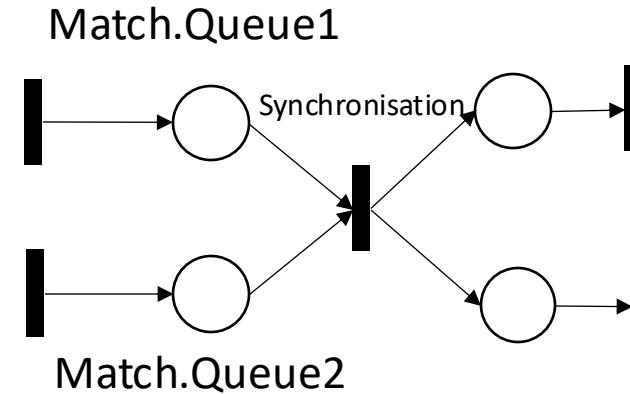
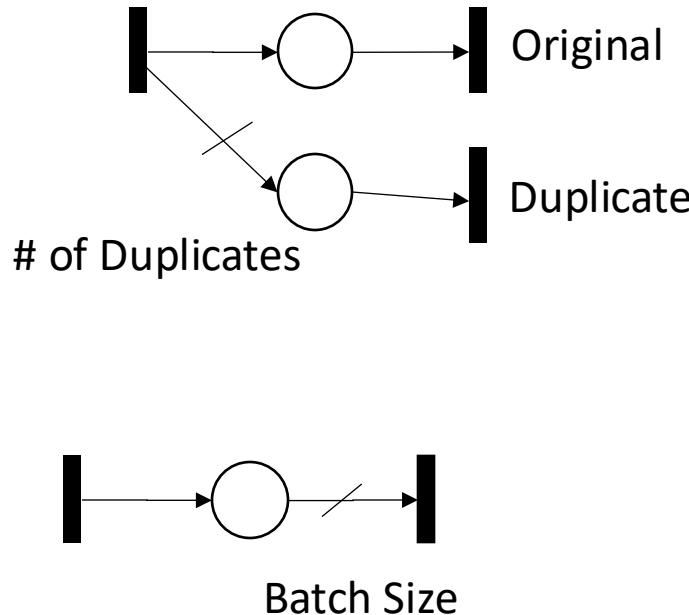
If Entity Type==Client



Otherwise

Simulation numérique

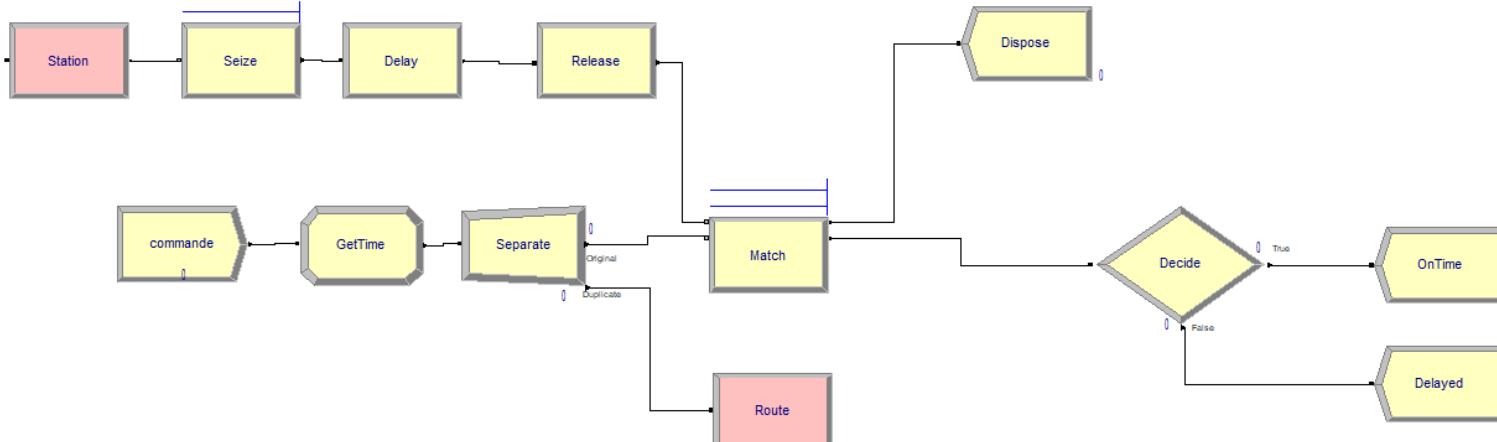
Blocs « Separate », « Match » et « Batch » de Advanced Process



56

Simulation Numérique

Exemple : Commande (OnTime / Delayed)



57

Montrer en détails ARENA

Simulation Numérique

Exemple : Commande (OnTime / Delayed)

Separate

Name: Separate Type: Duplicate Original

Percent Cost to Duplicates (0-100): 50 # of Duplicates: 1

OK Annuler Aide

Match

Name: Match Number to Match: 2

Type: Any Entities

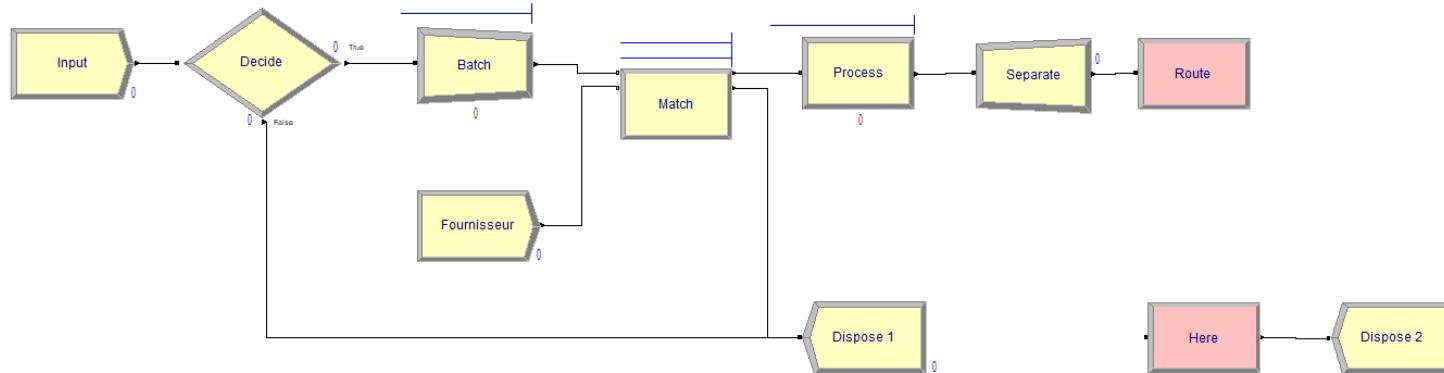
Batch Action after Matching: No Batch

OK Annuler Aide

58

Simulation numérique

- Bloc « Process » de Basic Process : « Seize+Delay+Release » (en série)
- Exemple : Fournisseur



Simulation Numérique

Exemple : Fournisseur

Batch

Name: Type:
Batch Temporary

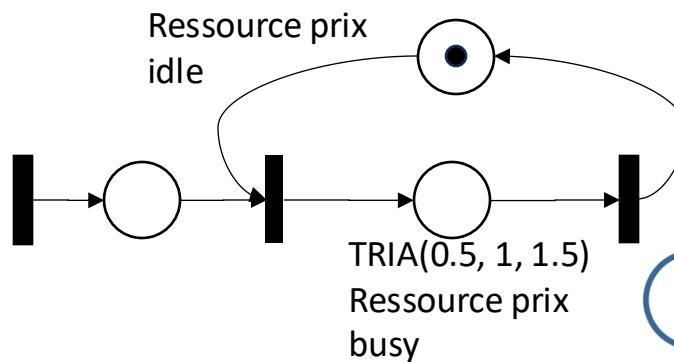
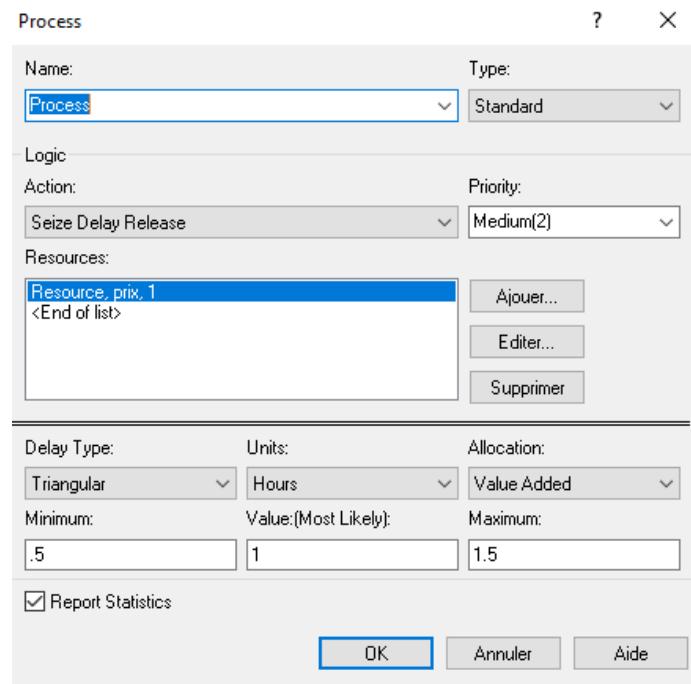
Batch Size: Save Criterion:
5 Last

Rule:
Any Entity

Representative Entity Type:

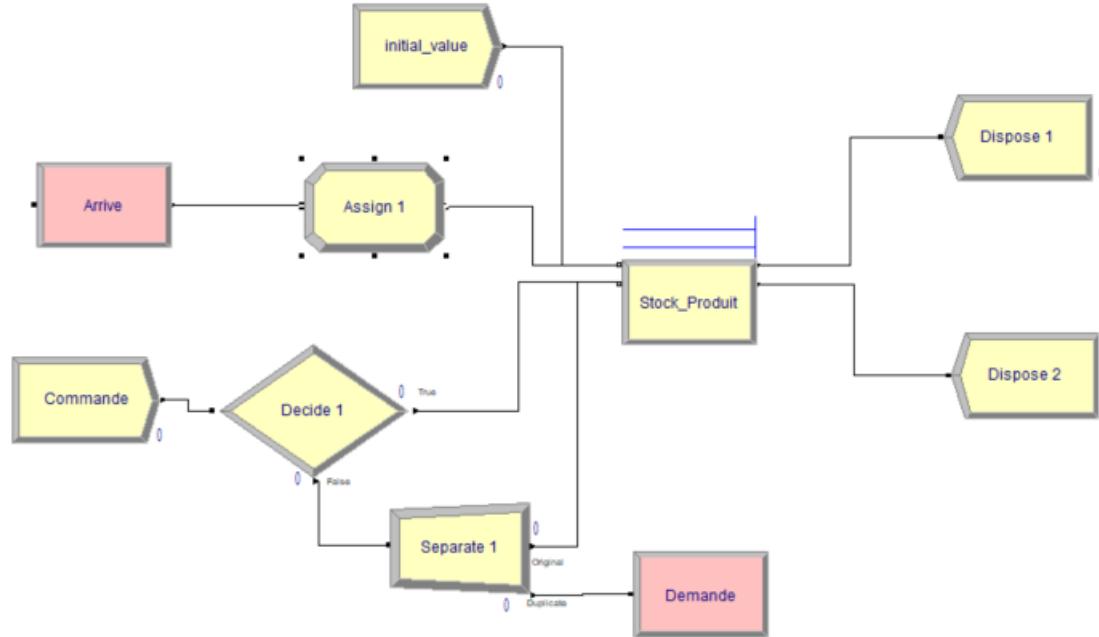
OK Annuler Aide

Montrer en détails ARENA



Simulation numérique

- Exemple : Stock



Simulation numérique

Create ? X

Name: Entity Type:

Time Between Arrivals
Type: Value: Units:

Entities per Arrival: Max Arrivals: First Creation:

Decide ? X

Name: Type:

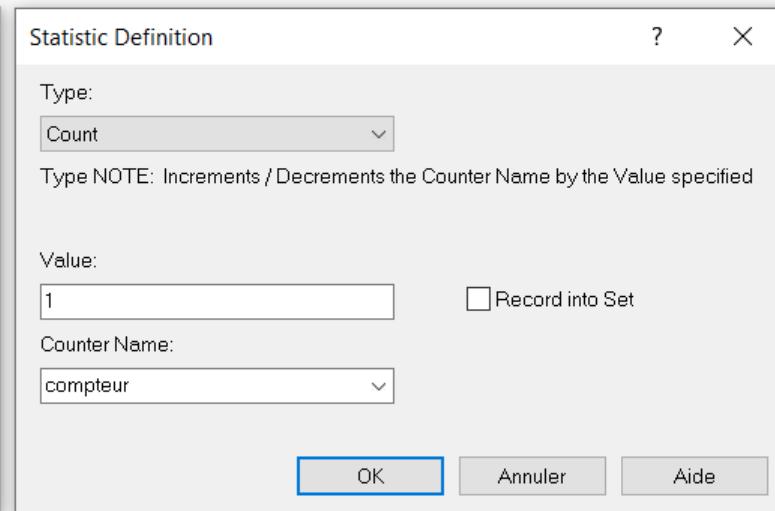
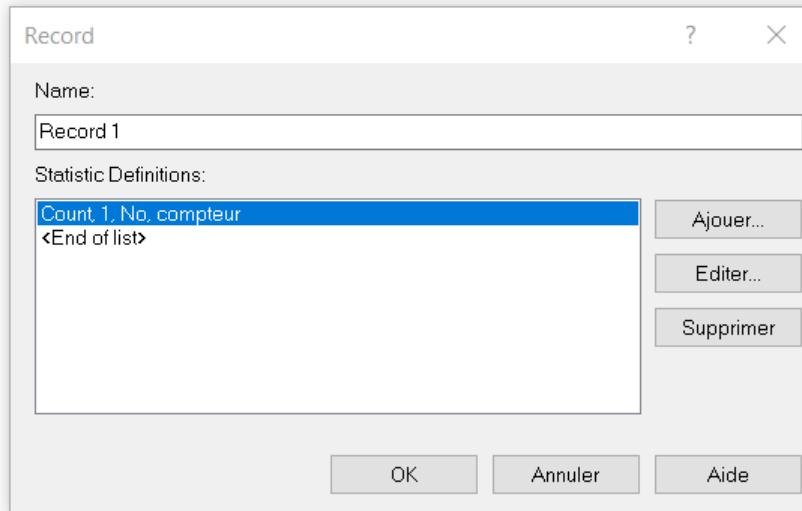
If:

Value:

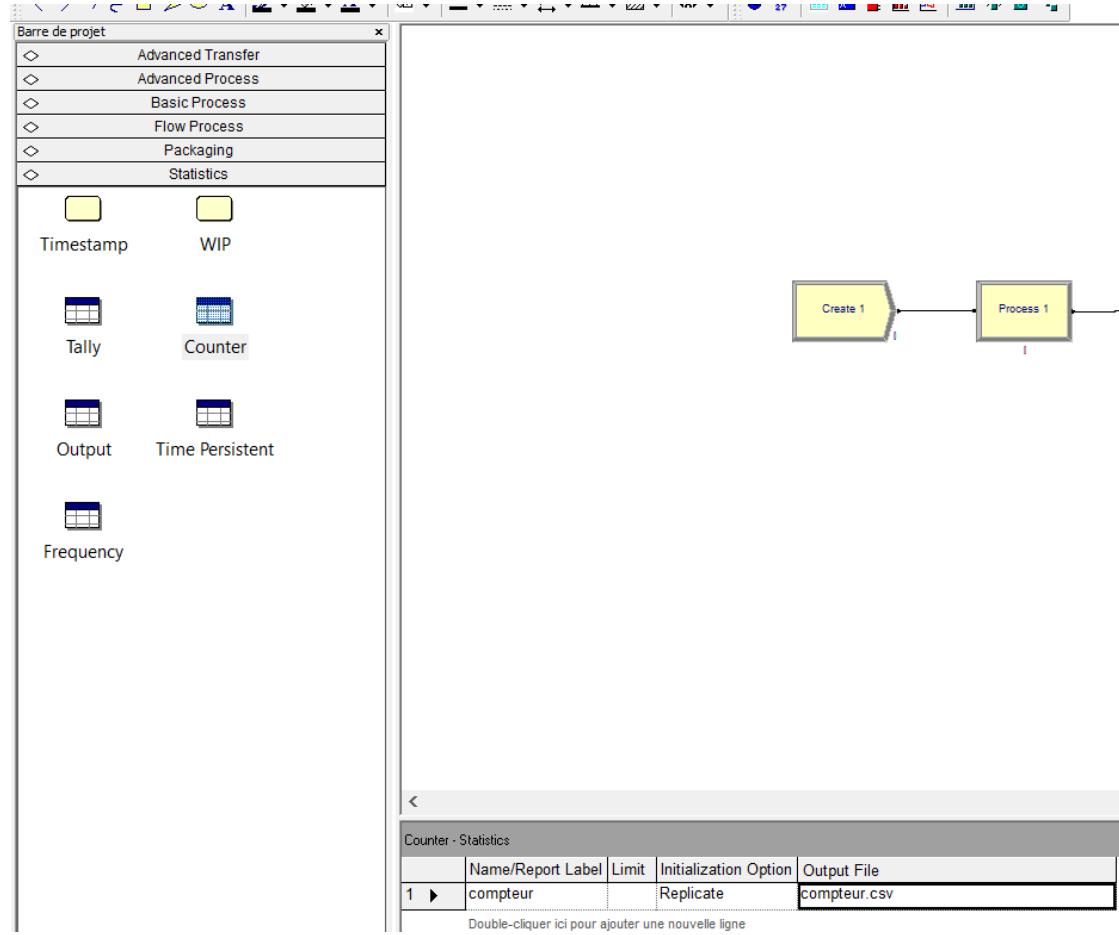
62

Simulation Numérique

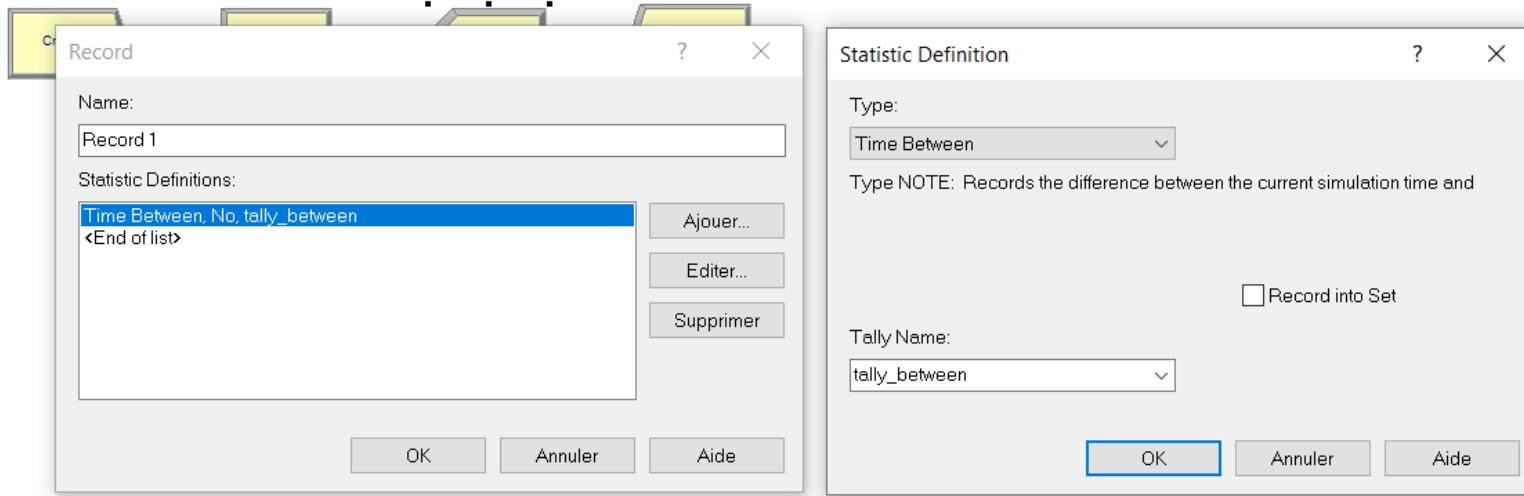
- Bloc d'Analyse : « Record » de Basic Process



Simulation Numérique



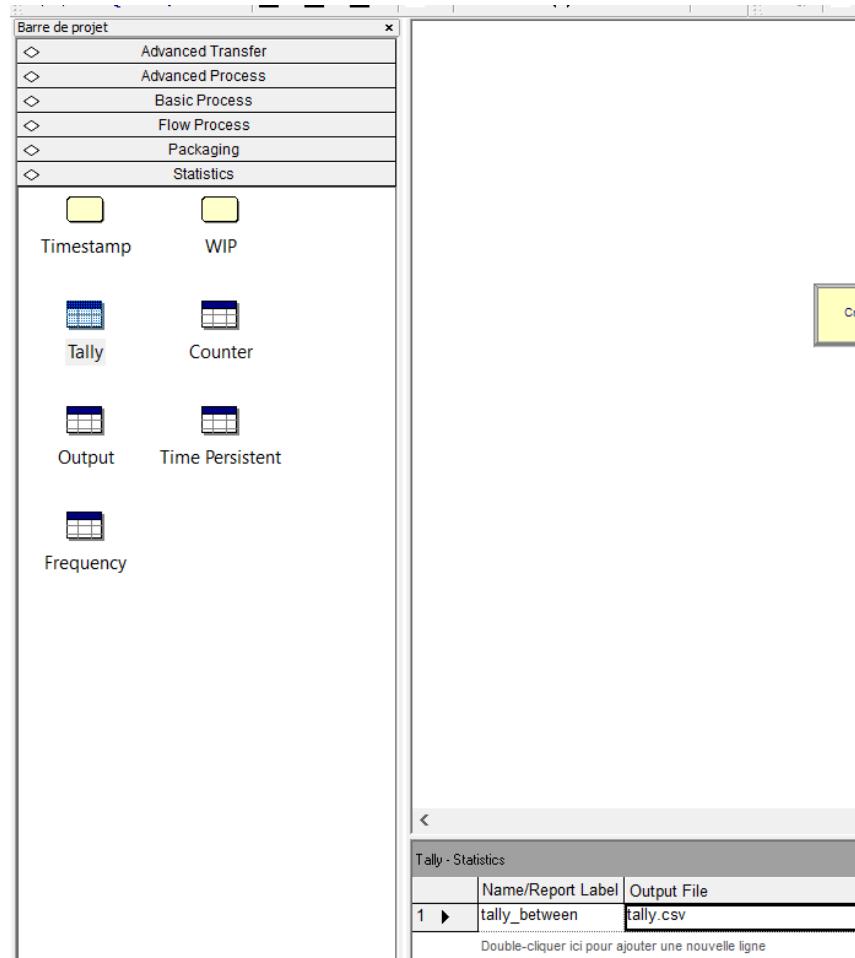
Simulation Numérique



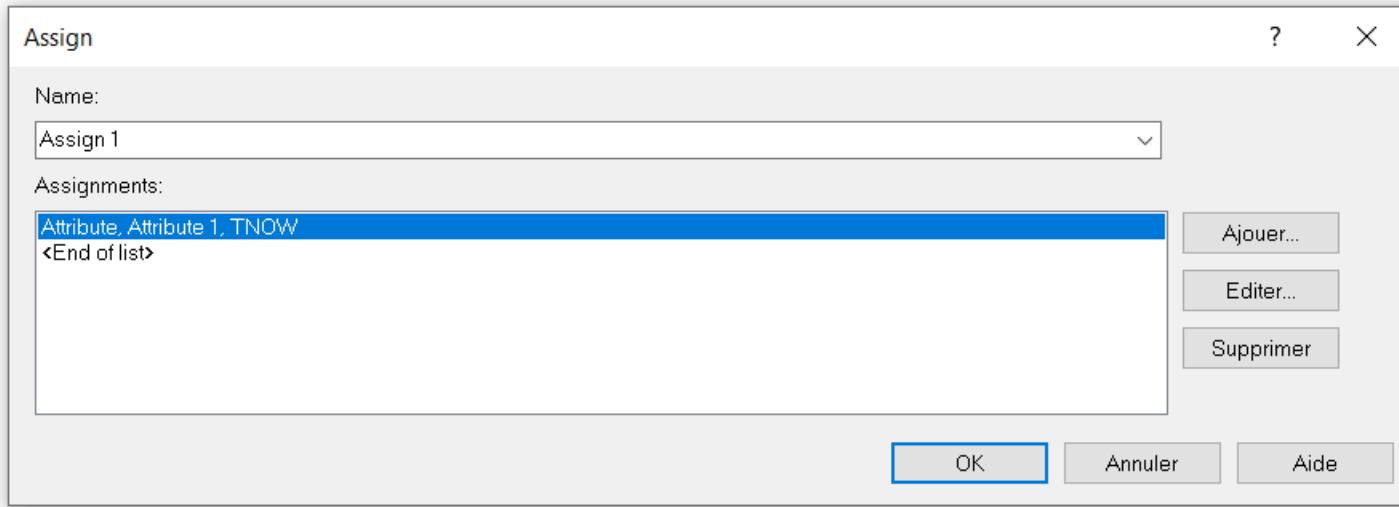
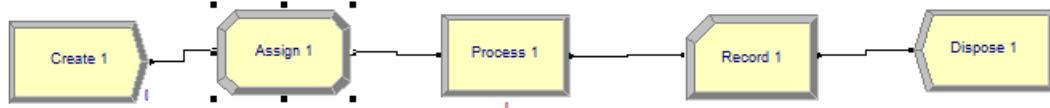
$$X(k + 1) - X(k)$$

where $X(k)$: occurrence time of entity labelled k

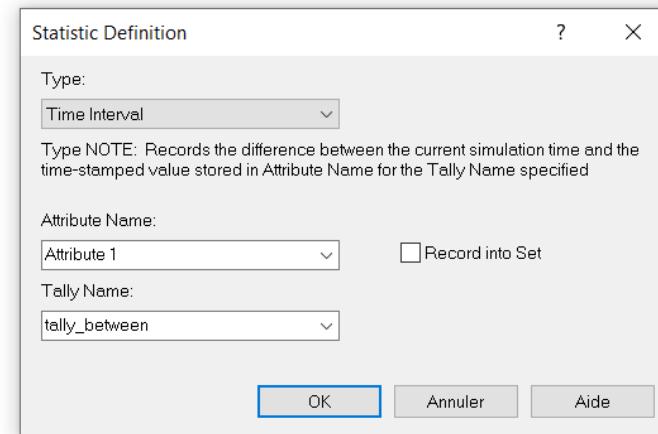
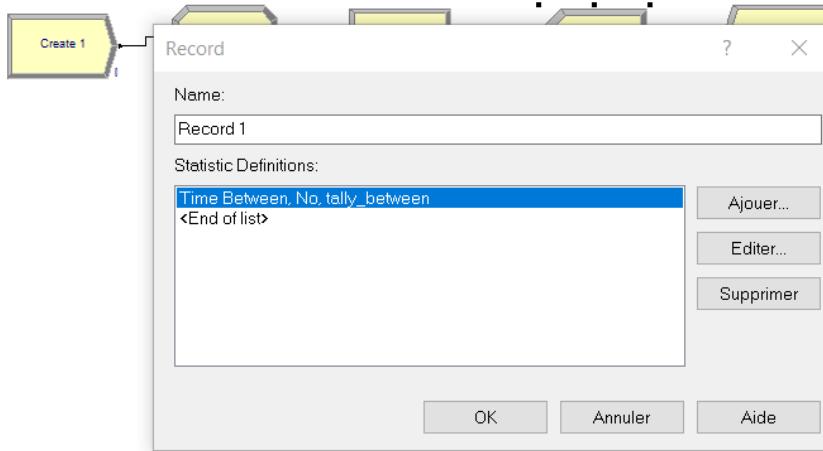
Simulation numérique



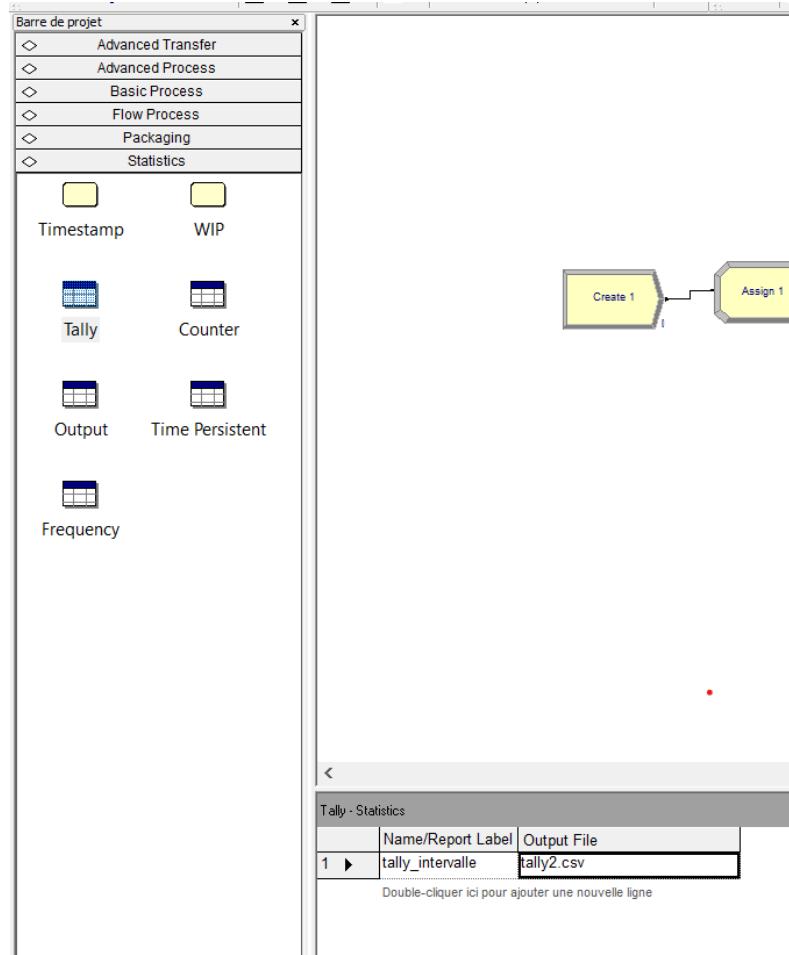
Simulation numérique



Simulation numérique



Simulation numérique



Simulation numérique

70

Process - Basic Process

Name	Type	Action	Priority	Resources	Delay Type	Units	Allocation	Minimum	Value	Maximum	Report Statistics
Process 1	Standard	Seize Delay Release	Medium(2)	1 rows	Triangular	Hours	Value Added	.5	1	1.5	<input checked="" type="checkbox"/>

Resource - Basic Process

Name	Type	Capacity	Busy / Hour	Idle / Hour	Per Use	StateSet Name	Failures	Report Statistics
1 ► Resource 1	Fixed Capacity	3	0.0	0.0	0.0		0 rows	<input checked="" type="checkbox"/>

Double-cliquer ici pour ajouter une nouvelle ligne

Process

Name: Process 1 Type: Standard

Logic

Action: Seize Delay Release Priority: Medium(2)

Resources:

Resource, Resource 1.1 <End of list>

Ajouter... Edit... Supprimer

Delay Type: Triangular Units: Hours Allocation: Value Added

Minimum: .5 Value: (Most Likely): Maximum: 1.5

Report Statistics

OK Annuler Aide

Simulation numérique

Barre de projet

- Advanced Transfer
- Advanced Process
- Basic Process
- Flow Process
- Packaging
- Statistics

Timestamp	WIP
Tally	Counter
Output	Time Persistent
Frequency	

Time Persistent

	Average	Half Width	Minimum Value	Maximum Value
Etat_file_attente	0.02760442	0,009350629	0.00	4.0000
Etat_ressource	1.0096	0,043539333	0.00	3.0000
..				

Process Flow:

```
graph LR; Create1[Create 1] --> Assign1[Assign 1]; Assign1 --> Process1[Process 1]; Process1 --> Record1[Record 1]; Record1 --> Dispose1[Dispose 1];
```

Time Persistent - Statistics

	Name/Report Label	Expression	Collection Period	Output File
1	Etat_file_attente	NQ(Process 1.Queue)	Entire Replication	NQ.csv
2	Etat_ressource	NR(Ressource 1)	Entire Replication	NQ.csv

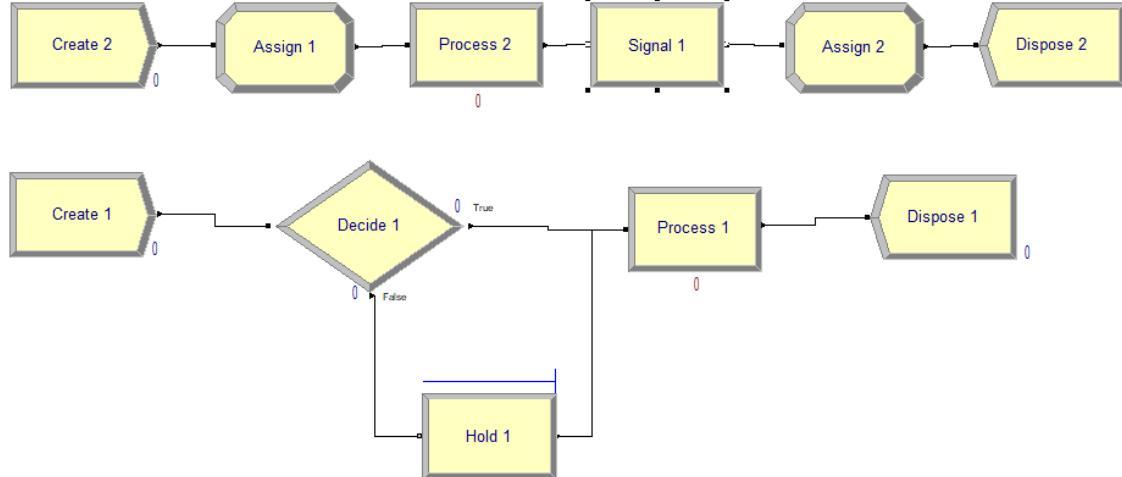
Double-cliquer ici pour ajouter une nouvelle ligne

NQ : Number in Queue

NR : Number of busy Resource units

Simulation

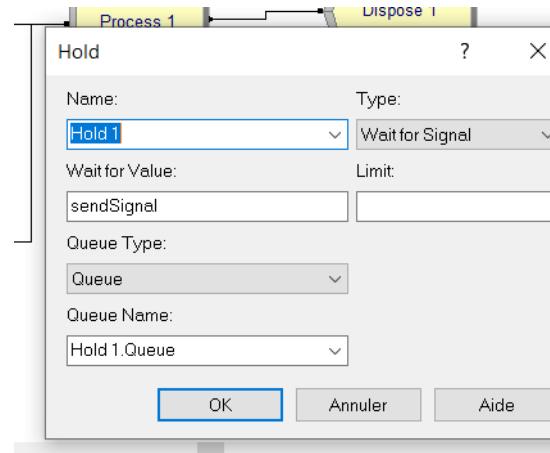
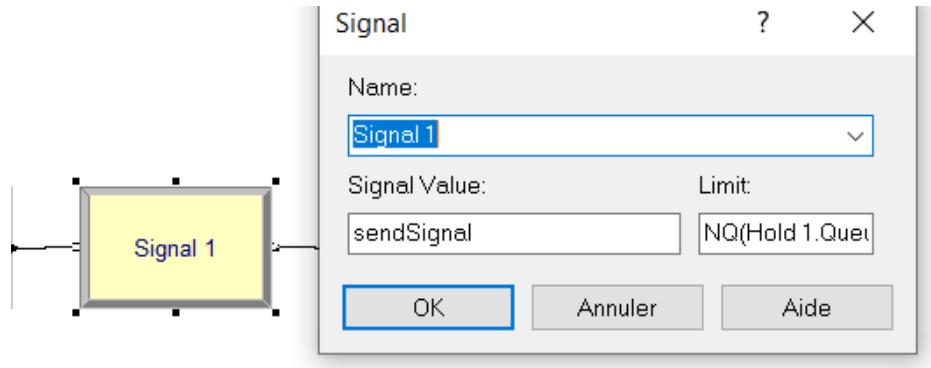
- D'autres exemples...
- Maintenance → montrer en détails



72



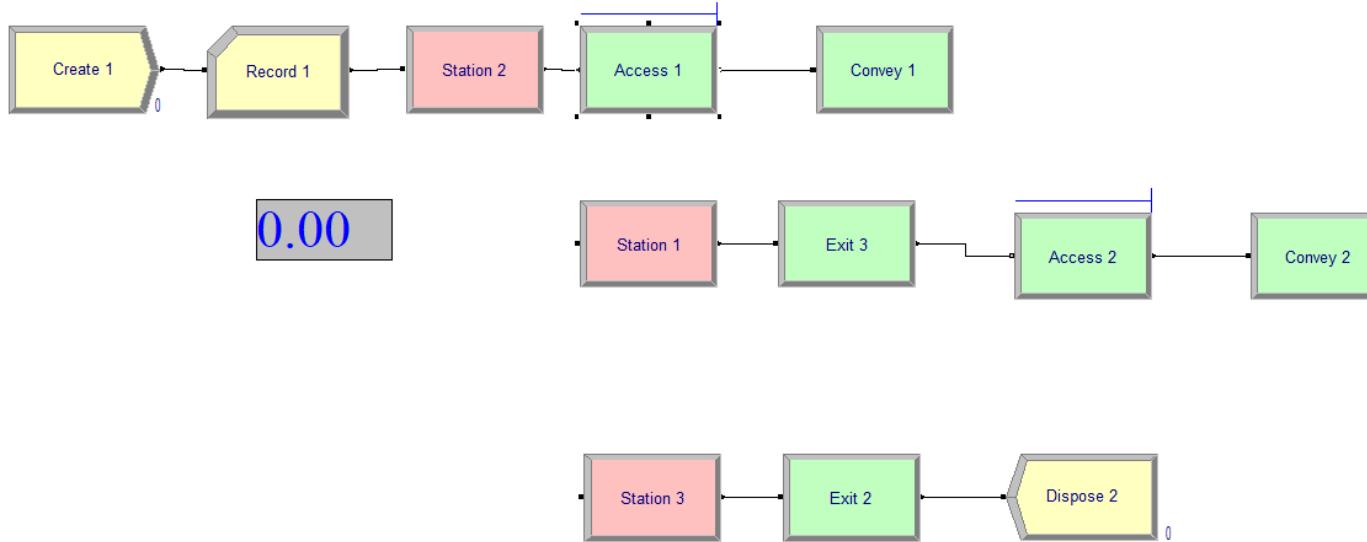
Simulation numérique



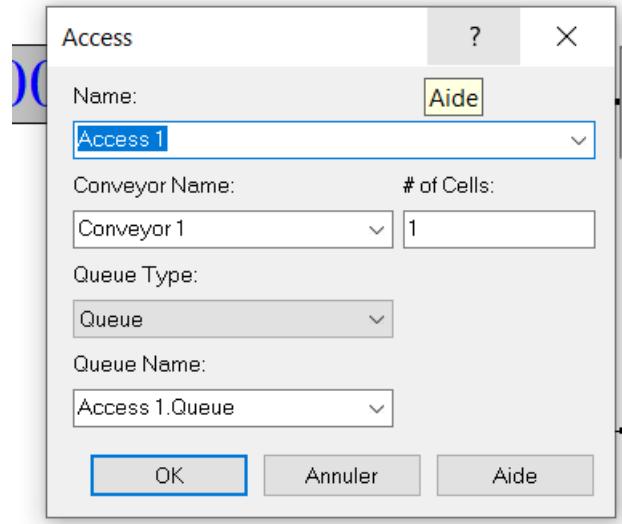
Envoie un signal pour libérer la totalité d'éléments dans Hold 1.Queue

Simulation numérique

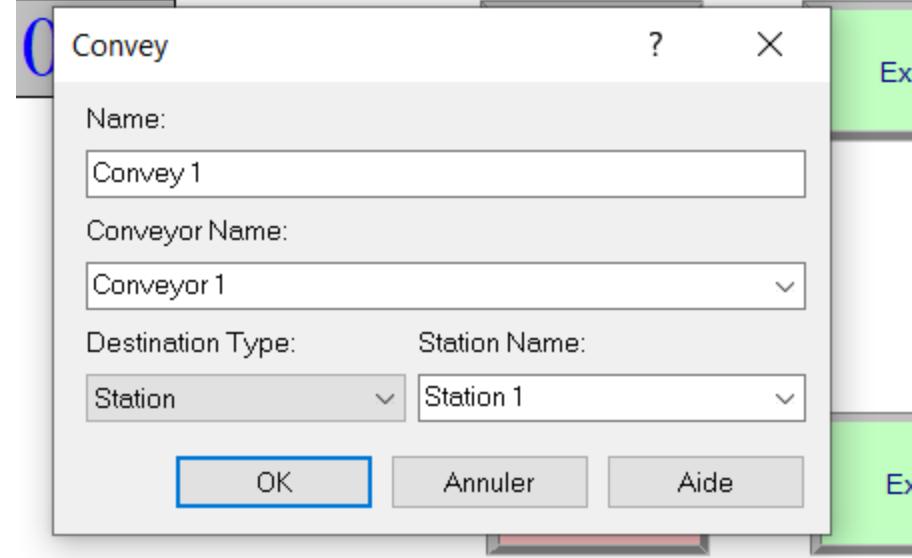
- Exemple : « Conveyor » → montrer en détails



Simulation numérique

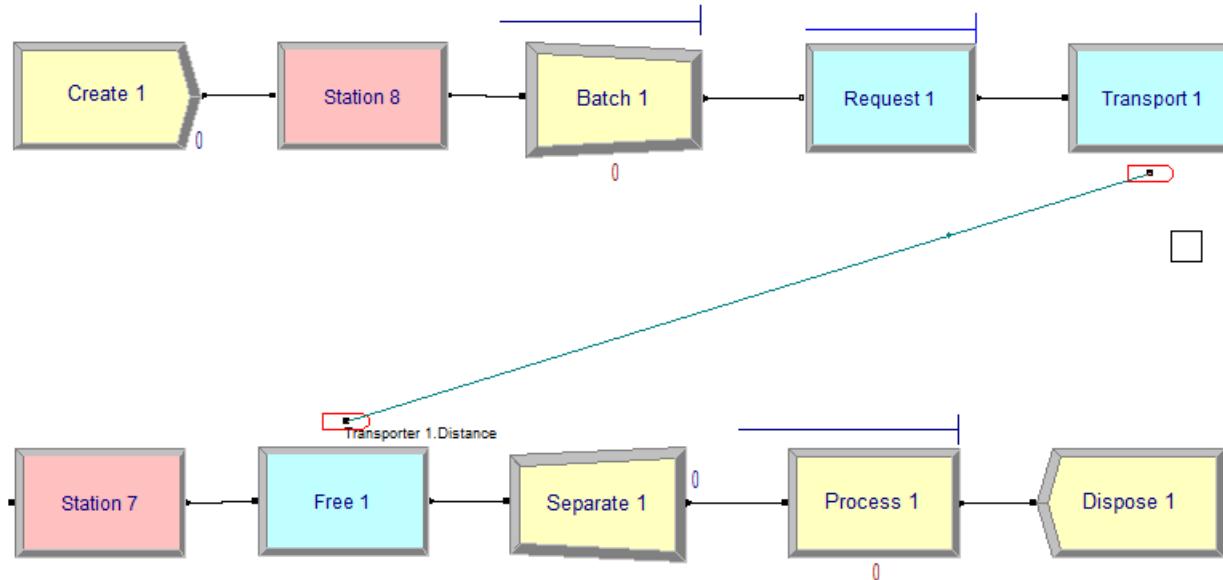


Nb de place dans « Conveyor »



Simulation numérique

- Exemple : « Transport » → montrer en détails



Simulation numérique

Request

Name: Request 1

Transporter Name: Transporter 1

Selection Rule: Cyclical Save Attribute: chargeAvion

Priority: High(1) Entity Location: Entity.Station

Velocity: Units: Per Hour

Queue Type: Queue

Queue Name: Request 1.Queue

OK Annuler Aide

Transport

Name: Transport 1

Transporter Name: Transporter 1 Unit Number: chargeAvion

Entity Destination Type: Station Name: Station

Velocity: Units: Per Hour

Guided Tran Destination Type: Entity Destination

OK Annuler Aide

Simulation numérique

Distance - Advanced Transfer

Name
1 ► Transporter 1.Distance [2 rows]

Double-cliquer ici pour ajouter une nouvelle ligne

Stations

	Beginning Station	Ending Station	Distance
1	Station 8	Station 7	50
2	Station 7	Station 8	10

Double-cliquer ici pour ajouter une nouvelle ligne

Transporter - Advanced Transfer

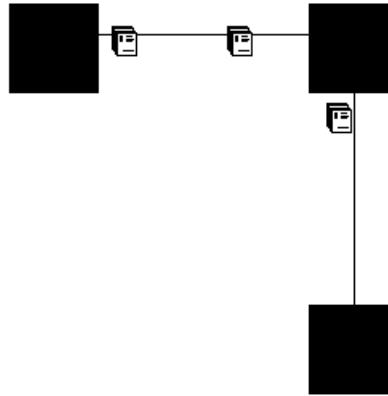
Name	Number of Units	Type	Distance Set	Velocity	Units	Initial Position Status	When Freed	Report Statistics
1 ► Transporter 1 [1]	1	Free Path	Transporter 1.Distance	1.0	Per Minute	0 rows	Remain Where Freed	<input checked="" type="checkbox"/>

Double-cliquer ici pour ajouter une nouvelle ligne



Simulation numérique

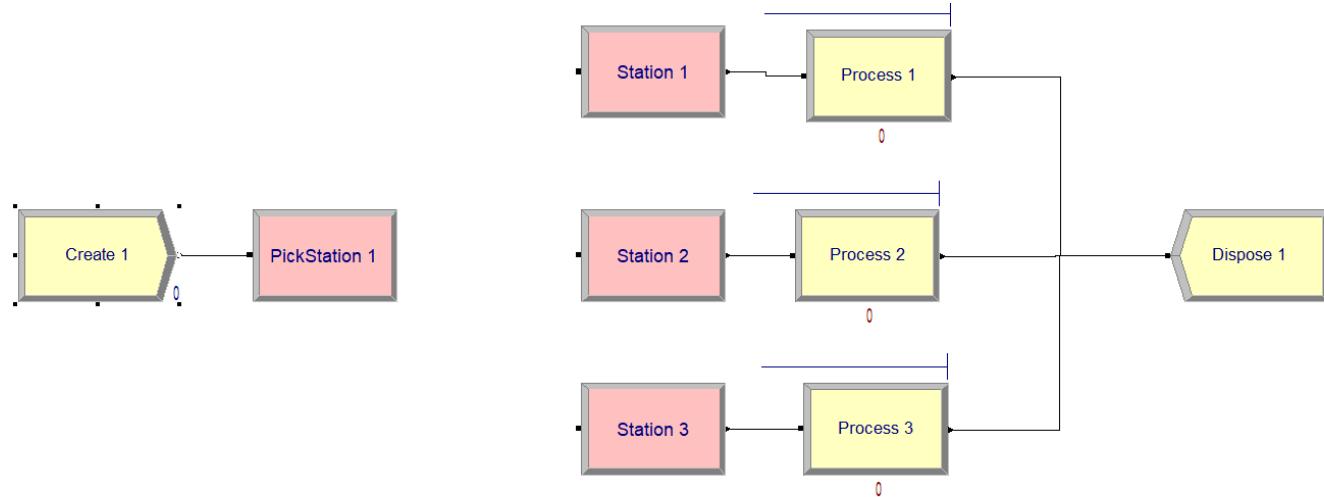
- Exercice : Animer « Conveyor » à l'aide de « Segments »



79

Simulation numérique

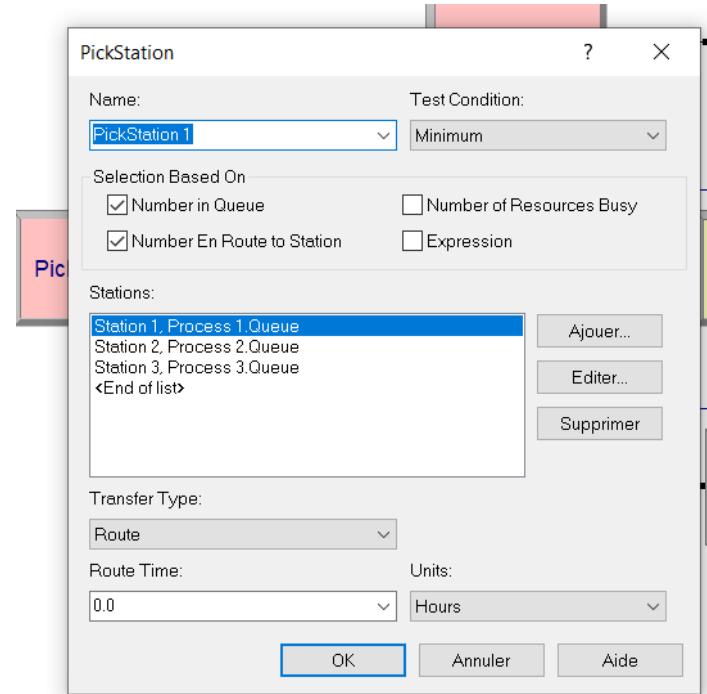
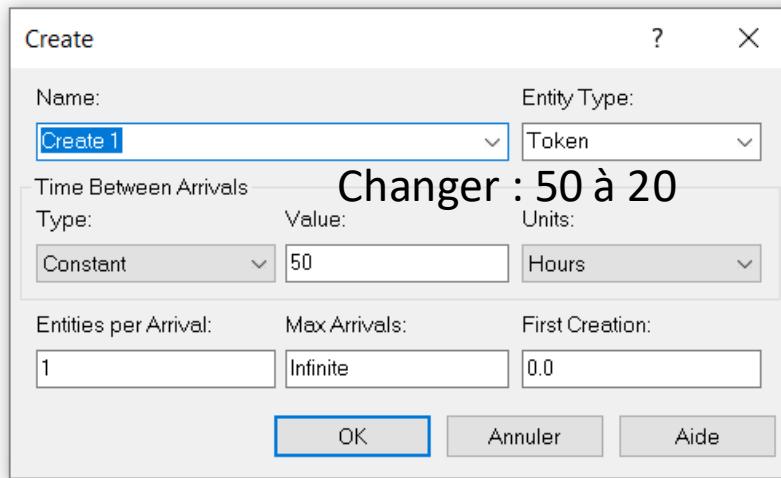
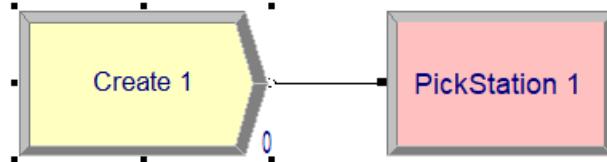
- « PickStation » de Advanced Transfer



80



Simulation numérique



Simulation numérique

- Exercice : Production avec deux machines (A et B) et (3 ou 4) ouvriers
- Ressources :
 - Produit Type 1 :
 - Process 1 : $N(3,0.2)$ min - ressources : Machine_A + (1) P
 - Process 2 : $N(7,0.5)$ min – ressources : Machine_B + (1) P
 - Process 3 : Const(1.5) min – ressources : (1) P
 - Produit Type 2 :
 - Process 4 : $N(10,0.2)$ min - ressources : Machine_A + (1) P
 - Process 2 : $N(7,0.5)$ min – ressources : Machine_B + (1) P
 - Process 3 : Const(1.5) min – ressources : (1) P
 - Commande T1 / T2 : $\text{Exp}(30)$ min / Commence à 0 / 1 entity per Arrival

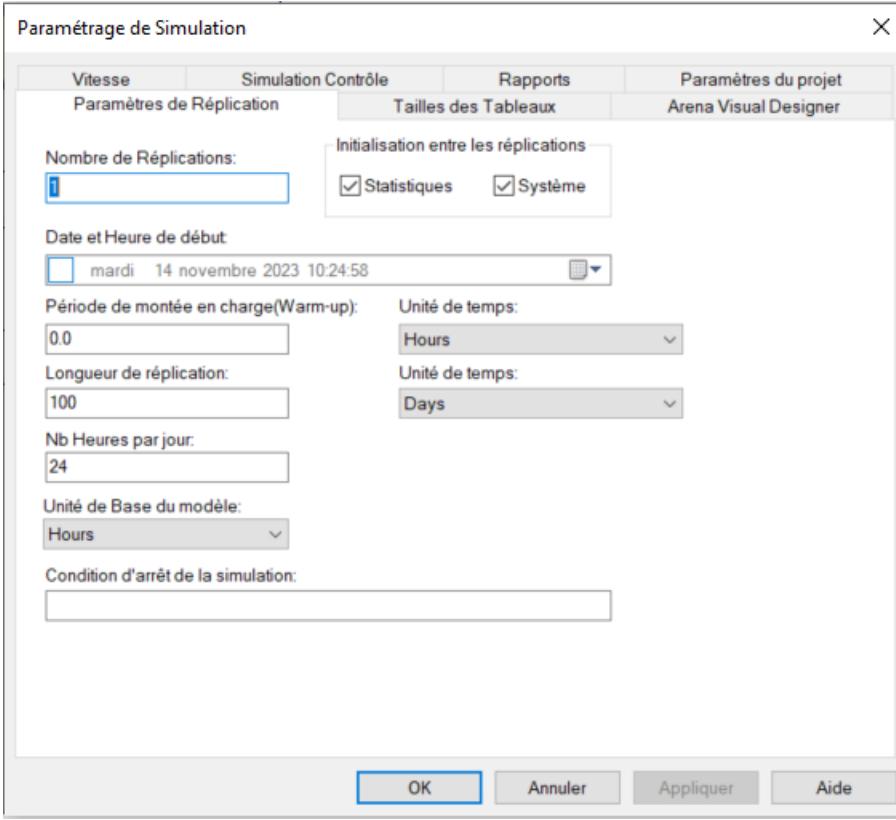
Simulation numérique

- Exercice : Production avec deux machines (A et B) et (3 ou 4) ouvriers
- Ressources :

Ressource	Coût Busy/h	Coût Idle/h	Coût à chaque utilisation	Capacité
Machine_A	\$100	\$40	\$15	1
Machine_B	\$50	\$30	\$10	1
Personne	\$20	\$40	-	Schedule

- Maintenance : à chaque 3 jours pour Machine_A seulement
 - Process : Triang(0.5, 2, 3.5) heures
- Régime : 6h00-14h00 → 3 P et 14h00-22h00 → 4 P

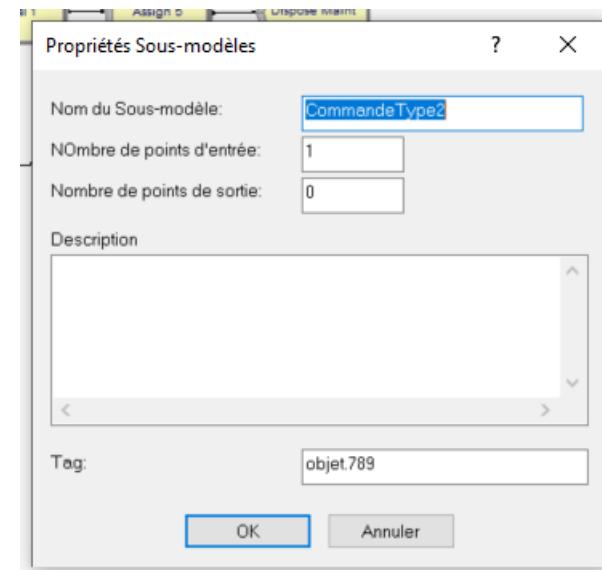
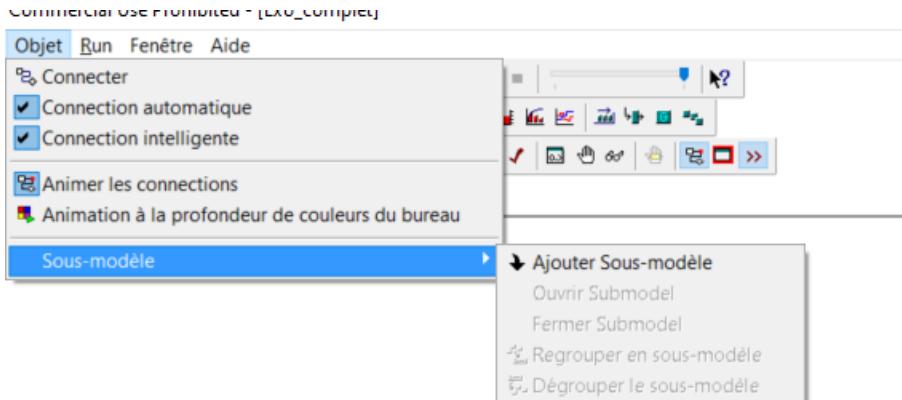
Simulation numérique



Etudier le rapport
Et proposer des
« modifications »

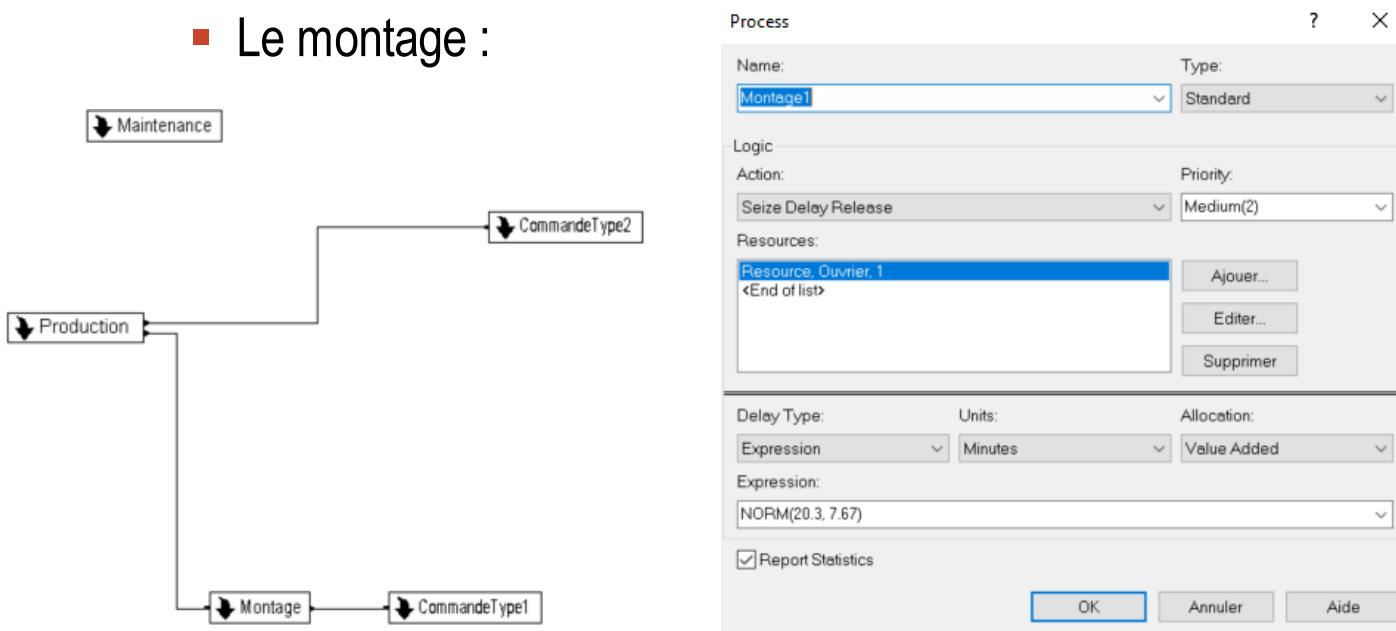
Simulation numérique

■ « Nested submodels »



Simulation numérique

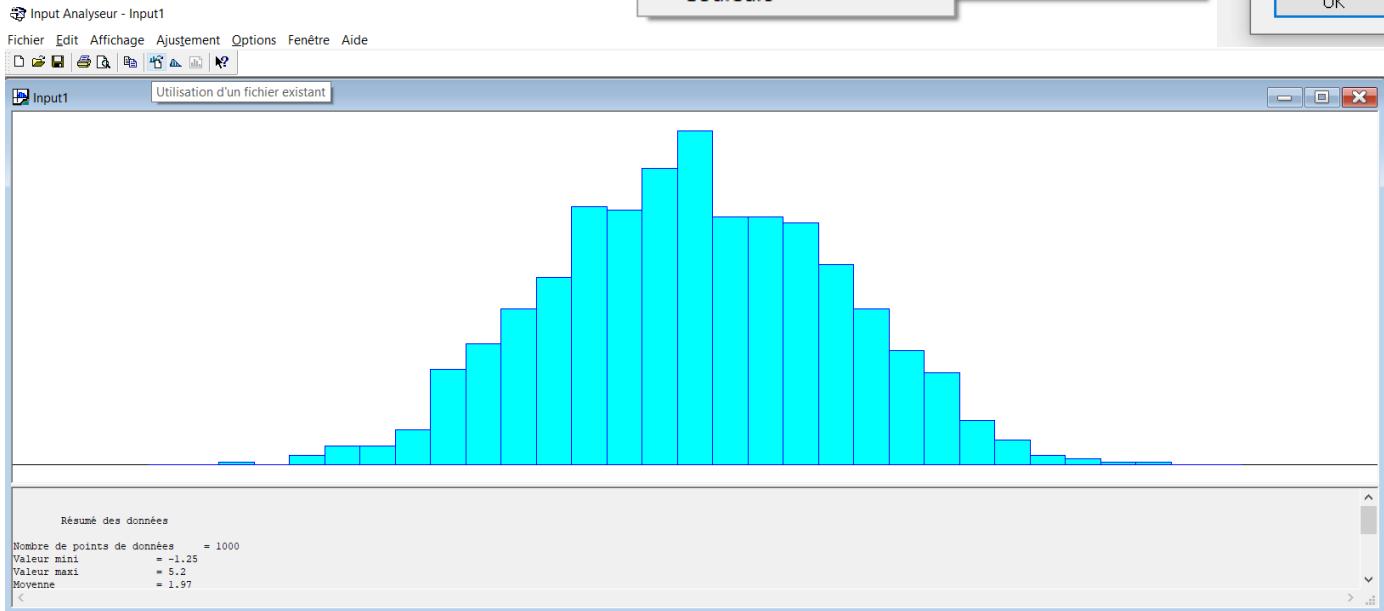
- Exercice : Le produit T1 doit être monté avant de terminer sa production
 - 3 postes de travail en parallèle existent avec 1 ouvrier chacun
 - Le montage :



Simulation numérique

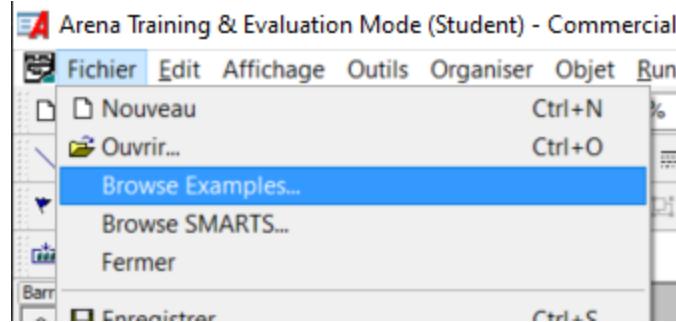
$O(\sqrt{nb_points})$ entre 5 à 40 intervalles

- « Input Analyzer »
- dataset.dst



Simulation numérique

- « Process Analyser »
- Exemple : « Airport Security Example »



Schedule - Basic Process

	Name	Type	Time Units	Scale Factor	File Name	Durations
1 ►	ScheduleOfficers	Capacity	Hours	1.0		[3 rows]

Double-cliquer ici pour ajouter une nouvelle ligne

Durations

	Value	Duration
1	MyVar	24

88

WWW.ARENASIMULATION.COM

Resource - Basic Process

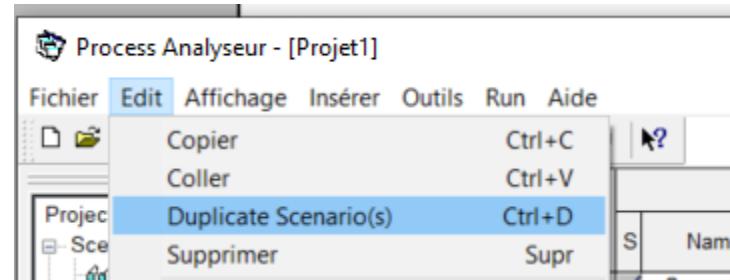
	Name	Type	Schedule Name	Schedule Rule	Busy / Hour	Idle / Hour	Per Use	StateSet Name	Failures	Report Statistics
1	Transportation Security Officer	Based on Schedule	ScheduleOfficers	Wait	10	12	0.0		0 rows	<input checked="" type="checkbox"/>

Double-cliquer ici pour ajouter une nouvelle ligne



Simulation numérique

The screenshot shows the Process Analyseur interface. On the left, a sidebar displays 'Project Items' like Scenarios, Controls, Responses, and Charts. The main area is a table titled 'Scenario Properties' with columns for S, Name, Program File, Reps, MyVar, All Resources.TotalCost, and Entity 1.TotalTime. It lists five scenarios: Scenario 1 through Scenario 5, all using the '1 : Airport Security Example' program file. A tooltip indicates: "Double-cliquer ici pour ajouter un nouveau scenario." A context menu is open at the bottom-left of the table, listing 'Insertion Contrôle...', 'Insertion Réponse...', and 'Propriétés du scenario...'. The status bar at the bottom right shows '89'.



Avec 2 policiers on réduit le temps passé à la queue, mais cela coûte un peu plus cher.

This screenshot shows a smaller view of the Process Analyseur interface. A context menu is open over the first row of a scenario table. The menu items are 'Insertion Contrôle...', 'Insertion Réponse...', and 'Propriétés du scenario...'. The status bar at the bottom right shows '89'.

Simulation numérique

Optquest optimization 3.a23 - Arena Visual Designer Training & Evaluation Mode - Commercial Use Prohibited - [Optimization 1*]

File Edit View Run Tools Window Help

Toolbox Optimization 1*

OptQuest Optimization Constraint Objective Suggested Solution

Tips Drag and Drop above items to Edit Explorer

Editor Explorer Optimization 1 Best Solutions Constraints Constraint 1 Controls Resources Transportation Security Officer User Specified MyVar (Variable) Objectives Objective 1 Optimization Responses

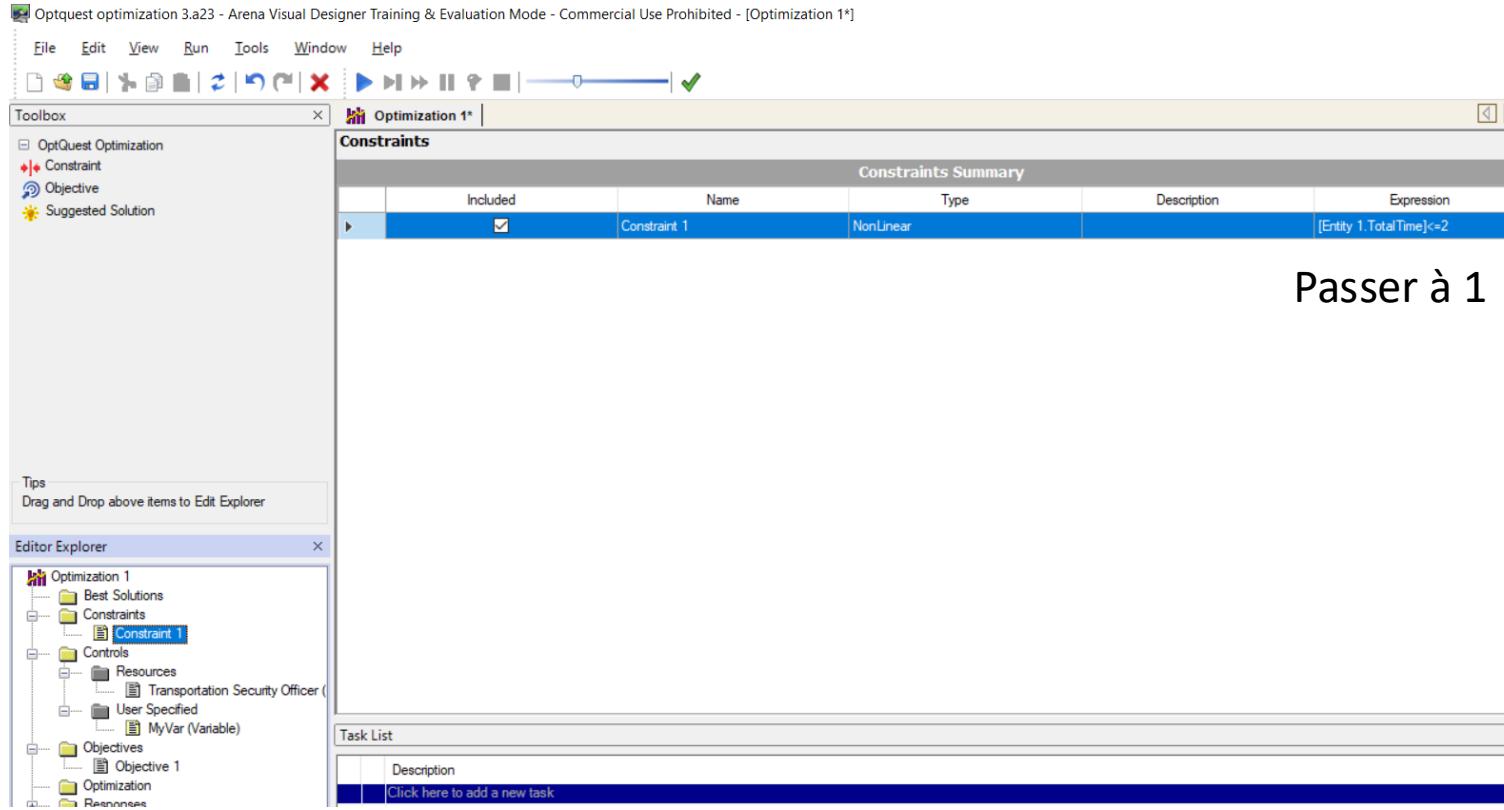
Constraints Constraints Summary

Included	Name	Type	Description	Expression
<input checked="" type="checkbox"/>	Constraint 1	NonLinear		[Entity 1.TotalTime]<=2

Task List

Description
Click here to add a new task

Passer à 1



The screenshot shows the Optquest optimization module within the Arena Visual Designer. The main window displays a constraint named 'Constraint 1' which is included and of type 'NonLinear'. The expression for this constraint is '[Entity 1.TotalTime]<=2'. Below this, the 'Editor Explorer' pane shows the project structure with nodes like 'Best Solutions', 'Constraints' (which contains 'Constraint 1'), 'Controls', 'Objectives', and 'Responses'. A 'Task List' pane at the bottom is empty, with a placeholder message 'Click here to add a new task'.

Simulation numérique

The screenshot shows the OptQuest Optimization 1* interface. On the left, there is a toolbox with icons for OptQuest Optimization, Constraint, Objective, and Suggested Solution. Below it is a Tips section with the instruction "Drag and Drop above items to Edit Explorer". The Editor Explorer window on the left lists the project structure: Optimization 1, Best Solutions, Constraints (with Constraint 1 and Constraint 2), Controls (with Resources, User Specified, and MyVar (Variable)). The main workspace is titled "Discrete" and contains a "Controls" section with a "Controls Summary" table. The table has columns for Included, Category, Name, Element Type, Type, Low Bound, Suggested Value, High Bound, Step, and Description. There are two rows: one for "MyVar" (Variable, Continuous type) and one for "Transportation ..." (Resource, Discrete type). A cursor arrow points to the "Type" column header of the second row.

	Included	Category	Name	Element Type	Type	Low Bound	Suggested Value	High Bound	Step	Description
	<input checked="" type="checkbox"/>	User Specified	MyVar	Variable	Continuous	4.5	5	5.5	N/A	
▶	<input type="checkbox"/>	Resources	Transportation ...	Resource	Discrete	0	0	1	1	

Simulation numérique

Airport Security Example For Process Analyser.a23 - Arena Visual Designer Training & Evaluation Mode - Commercial Use Prohibited - [Optimization 1*]

File Edit View Run Tools Window Help

Toolbox Optimization 1*

OptQuest Optimization
Constraint
Objective
Suggested Solution

Objectives Summary

Included	Name	Type	Goal	Description	Expression
<input checked="" type="checkbox"/>	Objective 1	NonLinear	Minimize		[All Resources TotalCost]

Tips
Drag and Drop above items to Edit Explorer

Editor Explorer

- Optimization 1
 - Best Solutions
 - Constraints
 - Constraint 1
 - Constraint 2
 - Controls
 - Resources
 - Transportation Security Officer
 - User Specified
 - MyVar (Variable)
 - Objectives
 - Objective 1
 - Optimization
 - Responses
 - Suggested Solutions

Task List

Description
Click here to add a new task
⚠ A license for OptQuest was not found. OptQuest will run in demonstration mode.

Simulation numérique

Optimization 1*

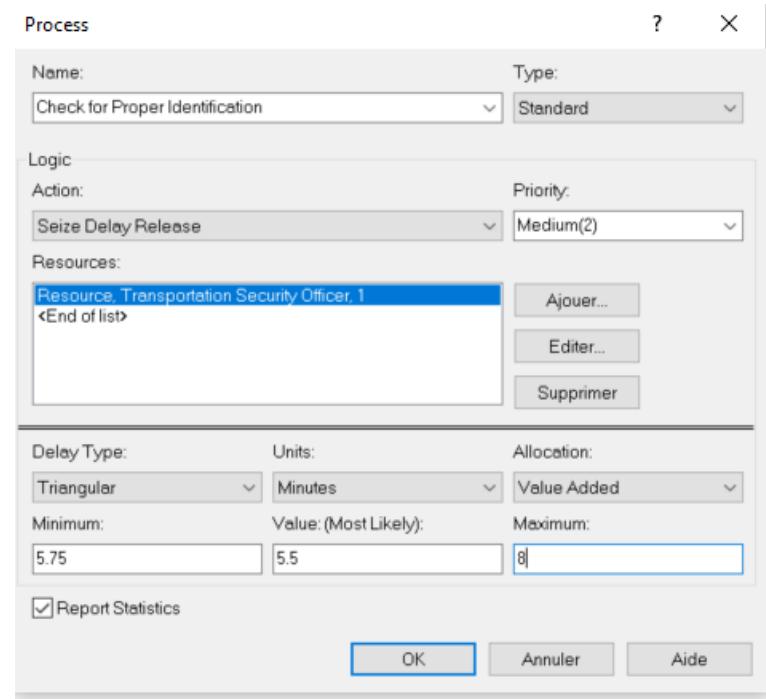
Best Solutions Optimal solution found.

	Included	Simulation	Objective Value	Status	MyVar
	<input type="checkbox"/>	7	11546.350478	Feasible	2
	<input type="checkbox"/>	5	17026.088617	Feasible	3
	<input type="checkbox"/>	8	22491.325633	Feasible	4
	<input type="checkbox"/>	1	27965.299256	Feasible	5
	<input type="checkbox"/>	2	33436.834211	Feasible	6
	<input type="checkbox"/>	10	38908.752087	Feasible	7
	<input type="checkbox"/>	6	44380.752087	Feasible	8
	<input type="checkbox"/>	9	49852.752087	Feasible	9
	<input type="checkbox"/>	4	55324.752087	Feasible	10
	<input type="checkbox"/>	3	6076.252795	Infeasible	1



Simulation numérique

- Exercice :
 - Refaire avec :
 - Best Value ?



Simulation numérique

Optimization 1

Objectives Summary

Objectives Summary						
	Included	Name	Type	Goal	Description	Expression
	<input type="checkbox"/>	Objective 1	NonLinear	Minimize		[All Resources.TotalCost]
▶	<input checked="" type="checkbox"/>	Objective 2	NonLinear	Minimize		[Entity 1.WaitTime]

95

Constraints

Constraints Summary

	Included	Name	Type	Description	Expression
	<input checked="" type="checkbox"/>	Constraint 1	NonLinear		[Entity 1.TotalTime]<=2
▶	<input checked="" type="checkbox"/>	Constraint 2	NonLinear		[All Resources.TotalCost]<=20000

Simulation numérique

Best Solutions

Optimal solution found.

Best Solutions

	Included	Simulation	Objective Value	Status	MyVar
	<input type="checkbox"/>	5	0.031221	Feasible	3
	<input type="checkbox"/>	8	0.221521	Feasible	2
	<input type="checkbox"/>	9	0.006046	Infeasible	4
	<input type="checkbox"/>	1	0.000764	Infeasible	5
	<input type="checkbox"/>	2	9.3E-05	Infeasible	6
	<input type="checkbox"/>	7	6E-05	Infeasible	7
	<input type="checkbox"/>	6	6E-05	Infeasible	8
	<input type="checkbox"/>	10	6E-05	Infeasible	9
	<input type="checkbox"/>	4	6E-05	Infeasible	10
	<input type="checkbox"/>	3	5.787979	Infeasible	1

En détails

- Nombre d'intégrants de chaque groupe : 2
- Mise en œuvre ARENA

97



**Maintenant, c'est
à vous !**

98

