



System Modeling and Simulation

2025-2026

Niveau : L2-INFO

hajmessaoud.nada@gmail.com

Dr. Nada Haj Messaoud

- Comprendre les fondamentaux de la modélisation et de la simulation de systèmes.
- Apprendre les différents types de modèles utilisés dans la représentation des systèmes.

- Objectifs du cours**
- Acquérir une expérience pratique avec des outils de simulation.
 - Appliquer la modélisation et la simulation pour résoudre des problèmes du monde réel.
 - Valider et analyser les modèles pour en assurer la précision et la fiabilité.

1. Introduction

a. Qu'est-ce qu'un système ?

- Un système est un ensemble de composants qui interagissent entre eux pour atteindre une fonction ou un objectif précis. Les systèmes peuvent être :
 - Naturels (par ex. : écosystèmes, systèmes climatiques).
 - Conçus (par ex. : automobiles, réseaux électriques).
 - Sociaux (par ex. : systèmes de santé, économies).

La modélisation est un outil essentiel dans l'évaluation des performances des systèmes informatiques (comme nous le verrons bientôt).

À noter que la modélisation est à la fois un « art » et une « science ».

1. Introduction

b. Qu'est-ce que la modélisation ?

La modélisation est le processus de création d'une représentation simplifiée d'un système réel. Elle capture les caractéristiques et comportements essentiels afin de rendre le système plus compréhensible et plus facile à gérer.

- Albert Einstein disait : « Les choses doivent être rendues aussi simples que possible, mais pas plus simples. »(Hector Guerrero, 2010, Excel Data Analysis).

Types de modèles :

- **Modèles mathématiques** : utilisation d'équations pour décrire le système.
- **Modèles physiques** : versions réelles et réduites de systèmes.
- **Modèles conceptuels** : schémas simplifiés ou modèles logiques.
- **Modèles de simulation** : programmes informatiques qui imitent le fonctionnement du système.

2. Évaluation des performances des systèmes informatiques

- La performance est un élément clé dans la conception, l'acquisition et l'utilisation des systèmes informatiques.
- L'objectif typique est d'obtenir les meilleures performances possibles pour un coût donné (par ex. : en argent, en énergie).
- Il est nécessaire d'avoir des connaissances de base sur les outils et techniques d'évaluation des performances des systèmes informatiques :
 - Quelles sont les exigences en matière de performance ?
 - Comment comparer différentes alternatives de systèmes ?

2. Évaluation des performances des systèmes informatiques

- **Exigences de performance :**

- Temps de réponse (latence).
- Débit (Throughput) : quantité de travail que le système peut accomplir durant une période donnée.
- Utilisation des ressources : efficacité avec laquelle le système utilise ses ressources (CPU, mémoire, disque, réseau).
- Scalabilité (extensibilité).
- Fiabilité.
- Efficacité énergétique.

2. Évaluation des performances des systèmes informatiques

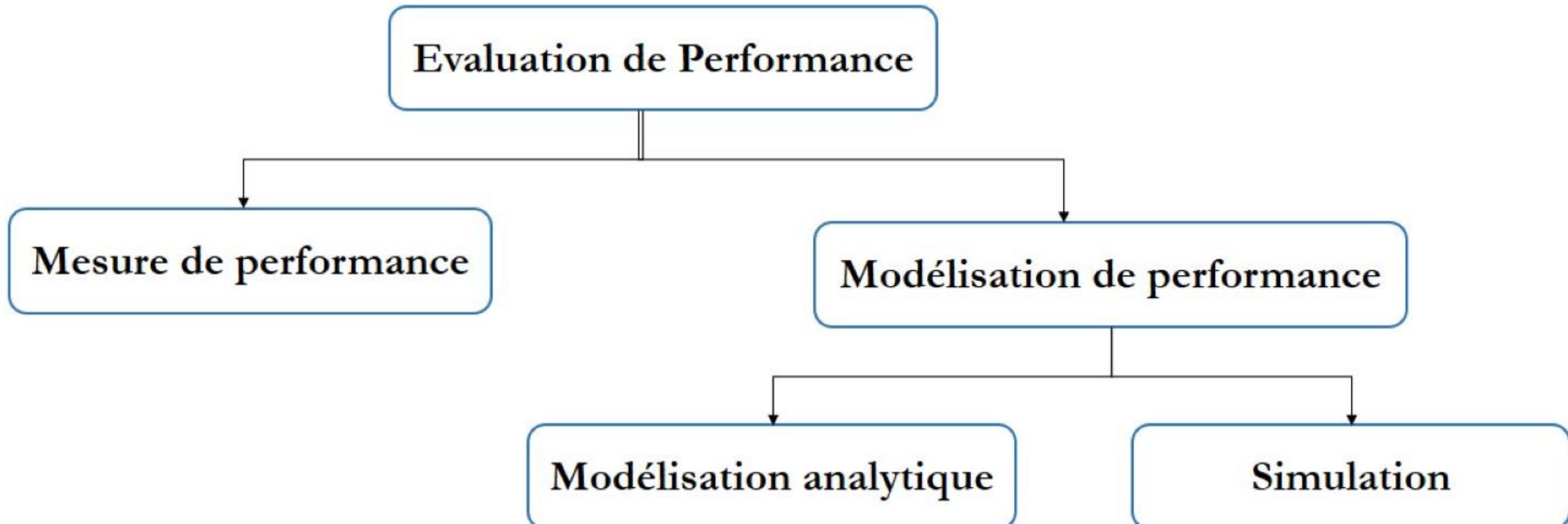
- Méthodes de comparaison des alternatives de systèmes

- **Benchmarking** : utiliser des tests standards (benchmarks) pour mesurer la performance des systèmes dans des scénarios similaires.
- **Analyse coût-performance** : Le meilleur système est celui qui offre le meilleur rapport performance/coût.
- **Surveillance**: surveiller et analyser l'utilisation des ressources dans différents systèmes afin de comprendre leur comportement et d'identifier les goulots d'étranglement.
- **Analyse multicritère** : comparer les systèmes sur la base de plusieurs critères (latence, débit, coût, consommation d'énergie, etc.), en les pondérant selon les priorités spécifiques du projet.
- **Simulations** : créer des modèles de systèmes pour simuler leurs performances sous différentes charges et configurations.

3. Approches d'évaluation des performances

- Trois approches principales :
 - **Expérimentale** : Collecter des mesures sur un système existant et évaluer de nouveaux algorithmes ou conceptions en les implémentant puis en les comparant dans ce système réel.
 - **Modélisation par simulation** : Créer un programme basé sur un modèle abstrait du système et le manipuler pour estimer ses performances.
 - **Modélisation analytique** : Utiliser un modèle mathématique du système et ajuster ses paramètres pour analyser les performances.

3. Approches d'évaluation des performances



Mesure de Performance

Mesure directe sur un système : dans des conditions réelles, obtenir des informations sur son comportement opérationnel.

- **Caractérisation de la charge de travail :** Il est essentiel de définir la charge de travail appliquée pendant la mesure.
 - **Résultats précis :** reflète le véritable comportement du système dans son environnement réel.
- ⌚ **Flexibilité limitée :** Cette approche peut être rigide, rendant difficile, voire impossible, l'ajustement de certains paramètres de la charge de travail (par exemple, le nombre d'utilisateurs ou le volume de données) pour tester le système dans différents scénarios.

Mesure de Performance

- **Construction d'un modèle :**

Créer une représentation simplifiée et abstraite d'un système en faisant des hypothèses sur son comportement.

Mesure de Performance

■ Pourquoi utiliser des modèles ?

Tester directement sur le système réel peut être :

- excessivement coûteux,
- potentiellement risqué, ou
- fortement perturbateur pour ses opérations normales.

→ Le système peut ne pas encore exister, par exemple lors de la phase de planification ou de conception.

Modélisation analytique

- **Utilisation de méthodes mathématiques**
 - Exemples : modèles de files d'attente.
- L'obtention de résultats numériques devient significativement plus simple et rapide.
- Pratique pour des estimations approximatives.
- Importance dans la conception et l'optimisation des systèmes.
- **Défis avec les modèles complexes:** Résoudre des modèles complexes peut poser des défis importants, nécessitant souvent des techniques mathématiques avancées ou des approximations

4. Processus de simulation : Modélisation par simulation

- Développer un programme de simulation qui met en œuvre le modèle.
 - Exécuter la simulation, collecter les données et estimer les mesures de performance à l'aide de la randomisation.
 - Un système peut être étudié à un niveau de détail arbitraire.
 - Le développement et l'exécution du programme de simulation peuvent être coûteux.
- **La modélisation analytique complète la simulation en offrant une base théorique pour concevoir et valider des modèles de simulation plus précis et détaillés.**

4. Modélisation par simulation

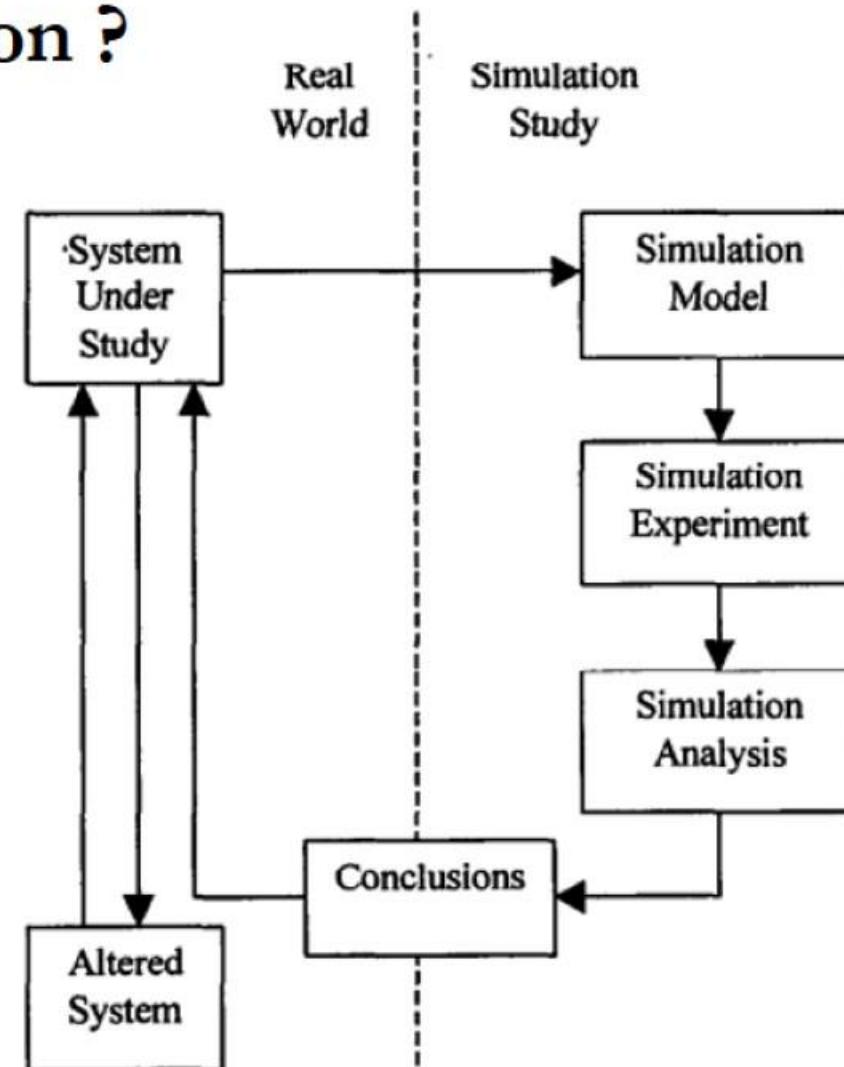
c. Qu'est-ce que la simulation ?

- **Simulation** : La simulation consiste à exécuter un modèle pour analyser le comportement d'un système sans impacter la réalité.
- Elle utilise différents types de modèles (statique/dynamique, déterministe/stochastique, continu/discret) pour tester des scénarios, réduire les risques d'échec, éviter les problèmes imprévus, optimiser les ressources et évaluer les performances sous diverses configurations sur le long terme.

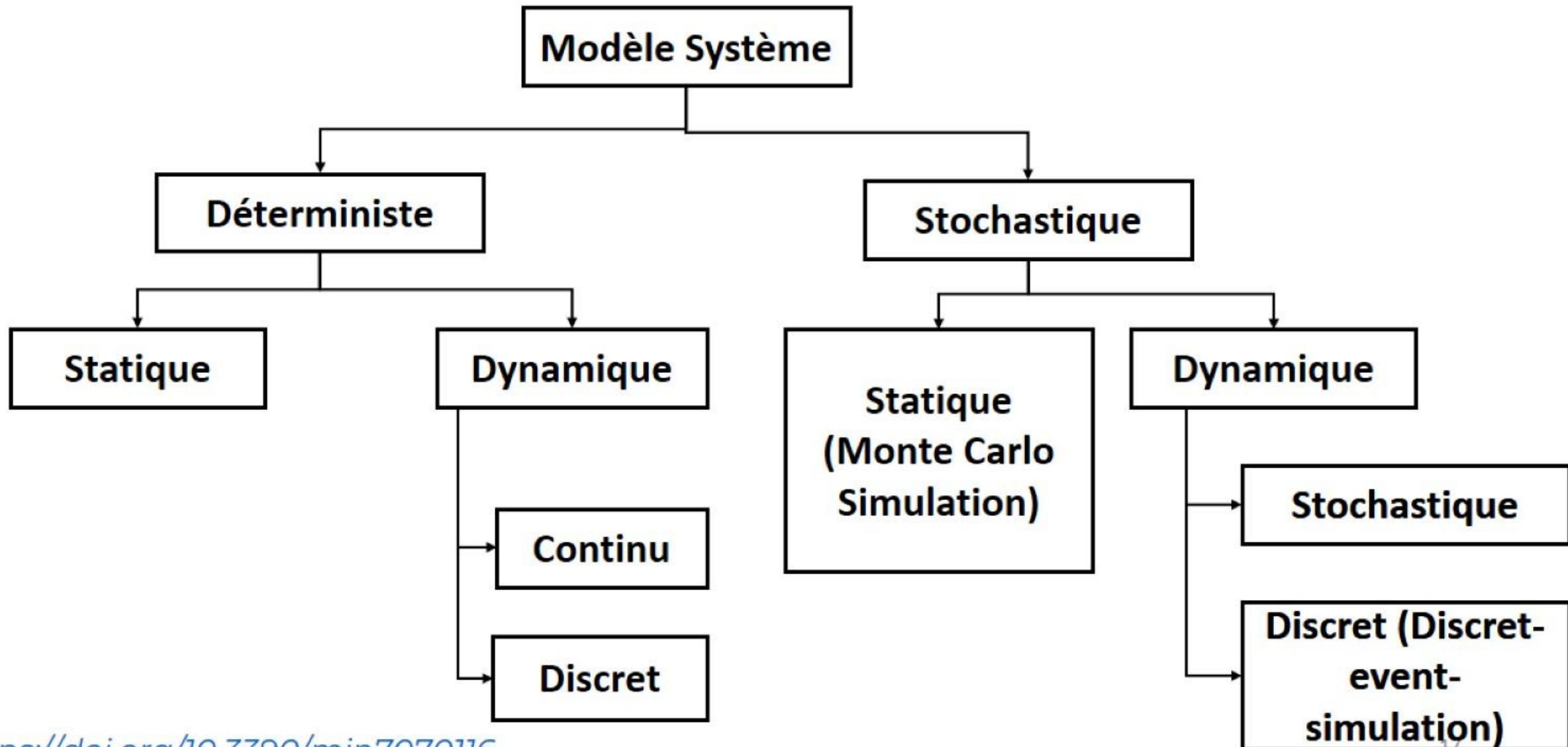
4. Modélisation par simulation

c. Qu'est-ce que la simulation ?

Schéma d'une étude de simulation



Types de modèles et de simulations



Types de modèles et de simulations

a. Modèles déterministes

- Utilisés lorsqu'on traite de processus dont le comportement peut être entièrement prédit du début à la fin.
- Avec un ensemble donné d'entrées, les modèles déterministes produisent toujours les mêmes sorties.
- Le système est indépendant de l'influence de variables aléatoires ou imprévisibles.

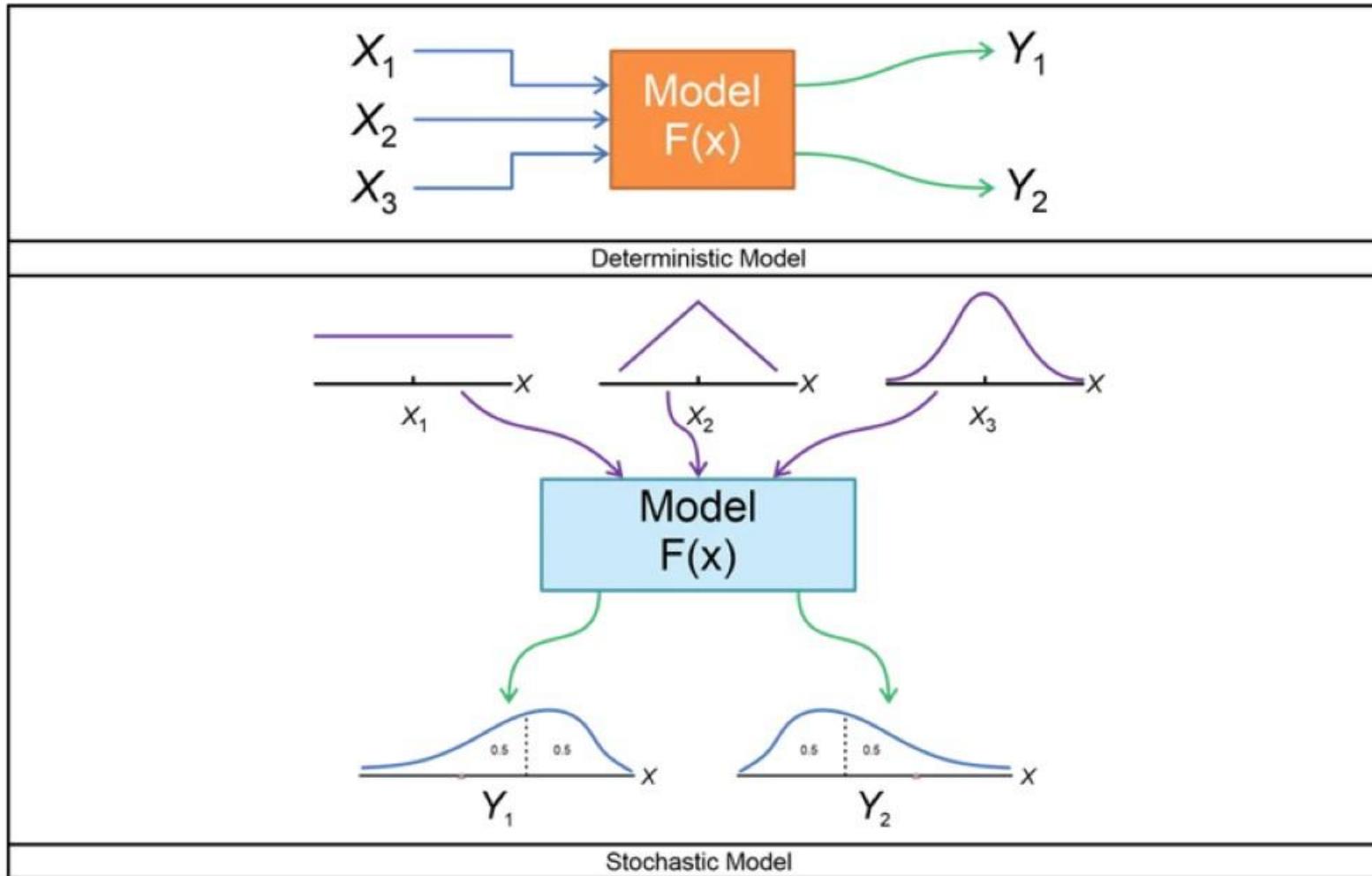
Types de modèles et de simulations

b. Modèles stochastiques

- Lorsque les aléas jouent un rôle significatif dans le comportement du système (exemple : les pannes).
- Utilisés lorsque nous ne pouvons pas estimer avec précision les variables d'entrée, soit parce que nous n'avons pas suffisamment d'informations sur ces variables, soit parce qu'elles changent dans une plage spécifique.

Types de modèles et de simulations

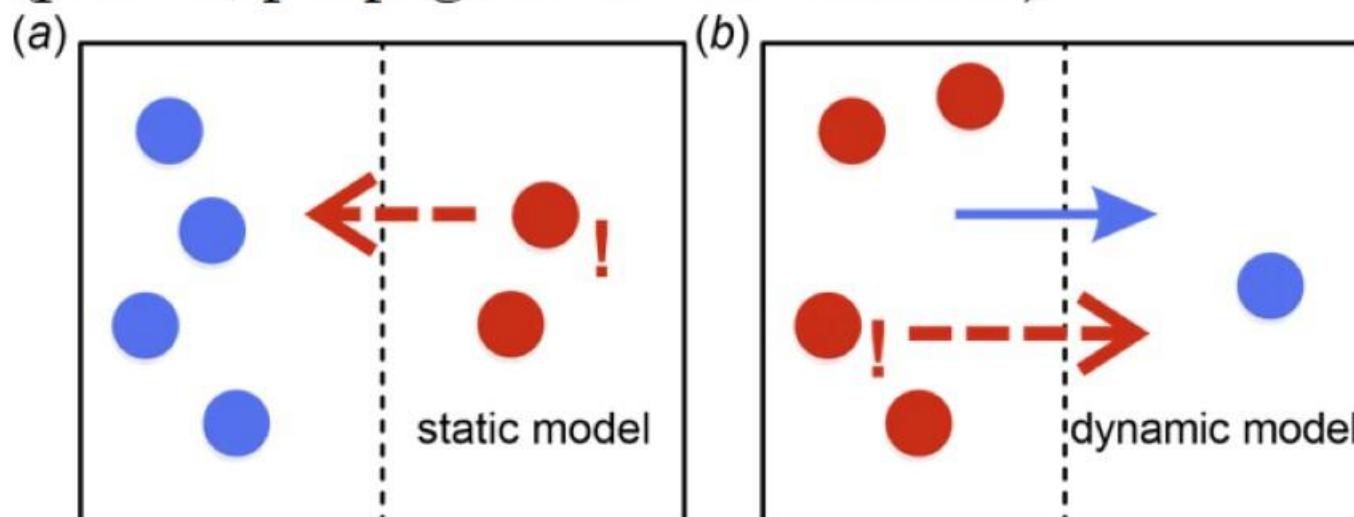
Modèles déterministes vs. stochastiques



Types de modèles et de simulations

b. Modèles statiques vs. modèles dynamiques

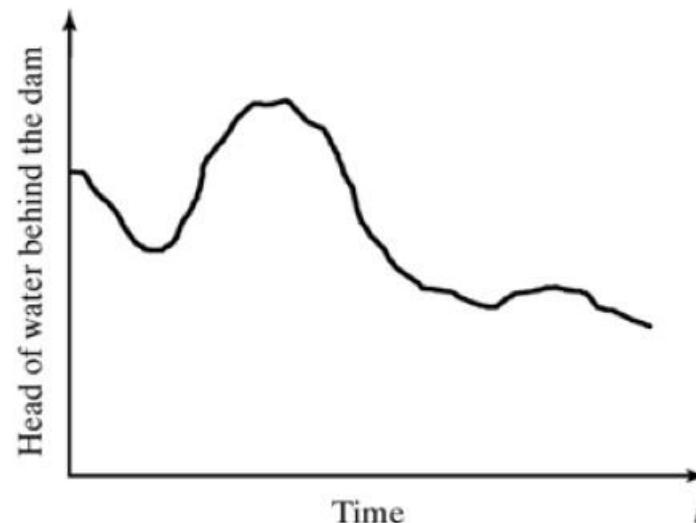
- **Modèles statiques** : Représentent les systèmes à un moment précis dans le temps (par ex., analyse structurelle d'un bâtiment).
- **Modèles dynamiques** : Suivent l'évolution du système au fil du temps (par ex., propagation d'une maladie).



Types de modèles et de simulations

c. Modèles continus vs. modèles discrets

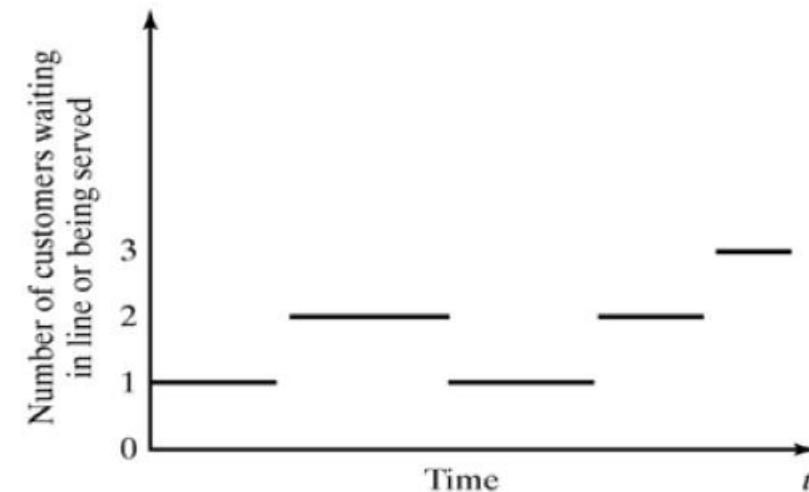
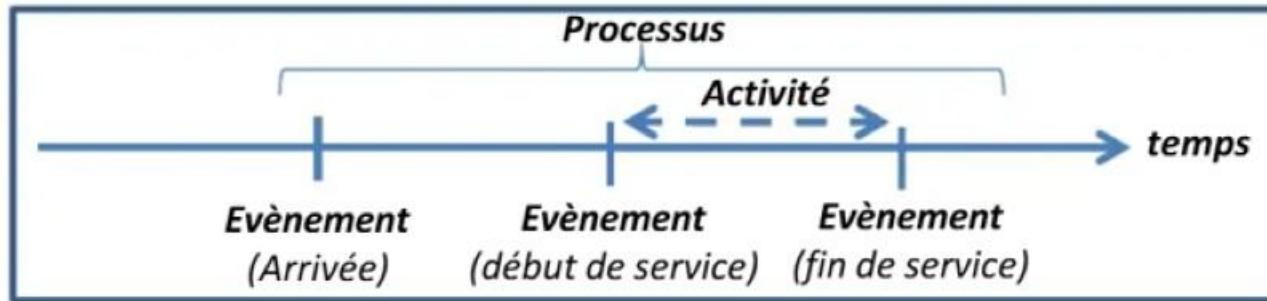
- **Modèles continus** : Changent de manière fluide avec le temps et sont décrits par des équations différentielles (ex. : dynamique des populations).



Types de modèles et de simulations

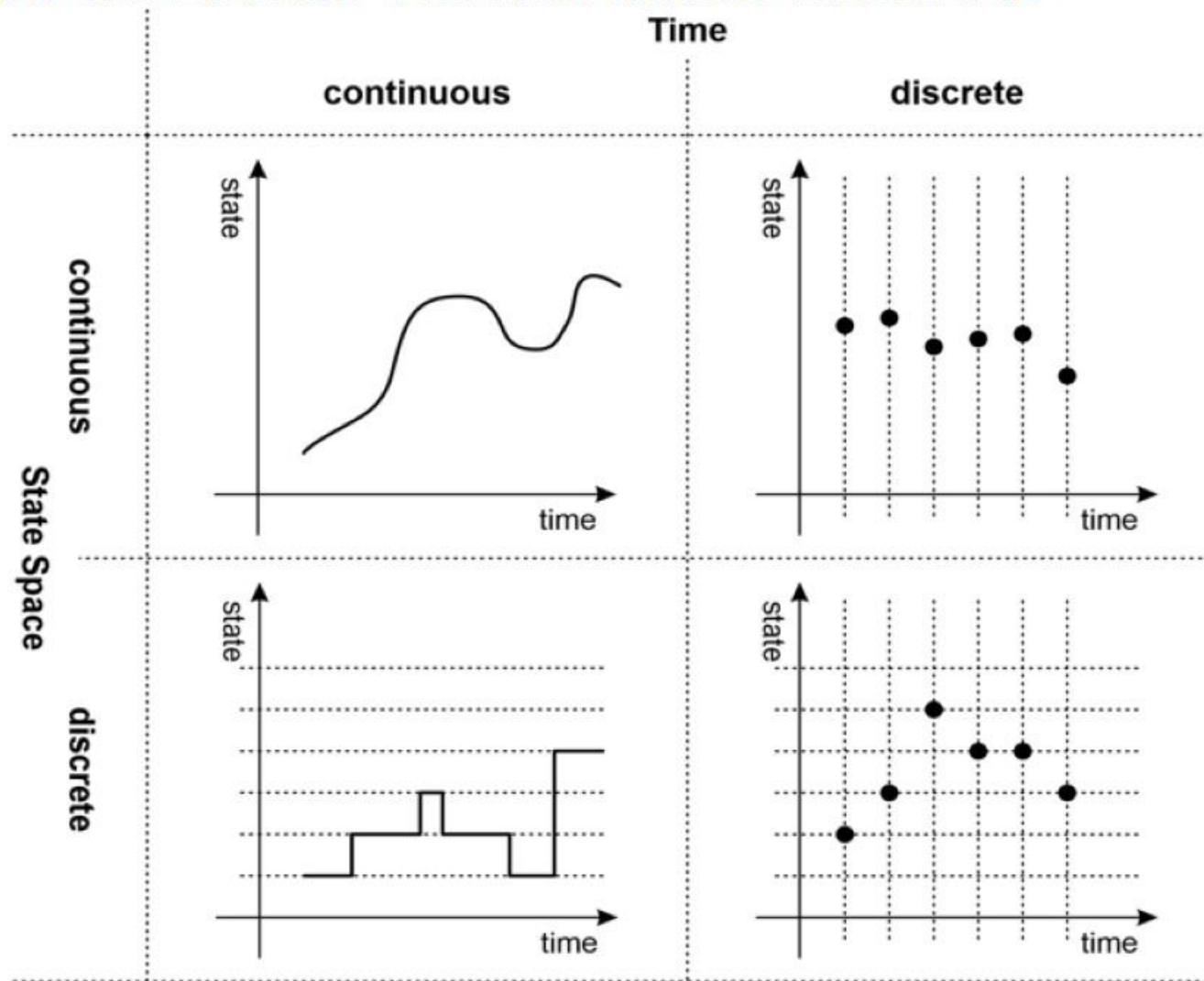
c. Modèles continus vs. modèles discrets

- **Modèles discrets** : Systèmes où les changements d'état se produisent à des points spécifiques dans le temps (ex. : arrivées de clients dans une file d'attente).



Types de modèles et de simulations

c. Modèles continus vs. modèles discrets



Types de modèles et de simulations

d. Modèles hybrides

Combinent des composantes continues et discrètes pour représenter des systèmes qui présentent les deux types de comportements.

ex. : processus de fabrication avec des machines fonctionnant en continu et des événements discrets comme les pannes de machines.

Exemples de systèmes et classification

Système 1 : Temps d'arrivée des étudiants dans une salle de classe.

Système 2 : Gestion d'un barrage hydraulique

Système 3 : Planification d'un réseau de livraison de colis

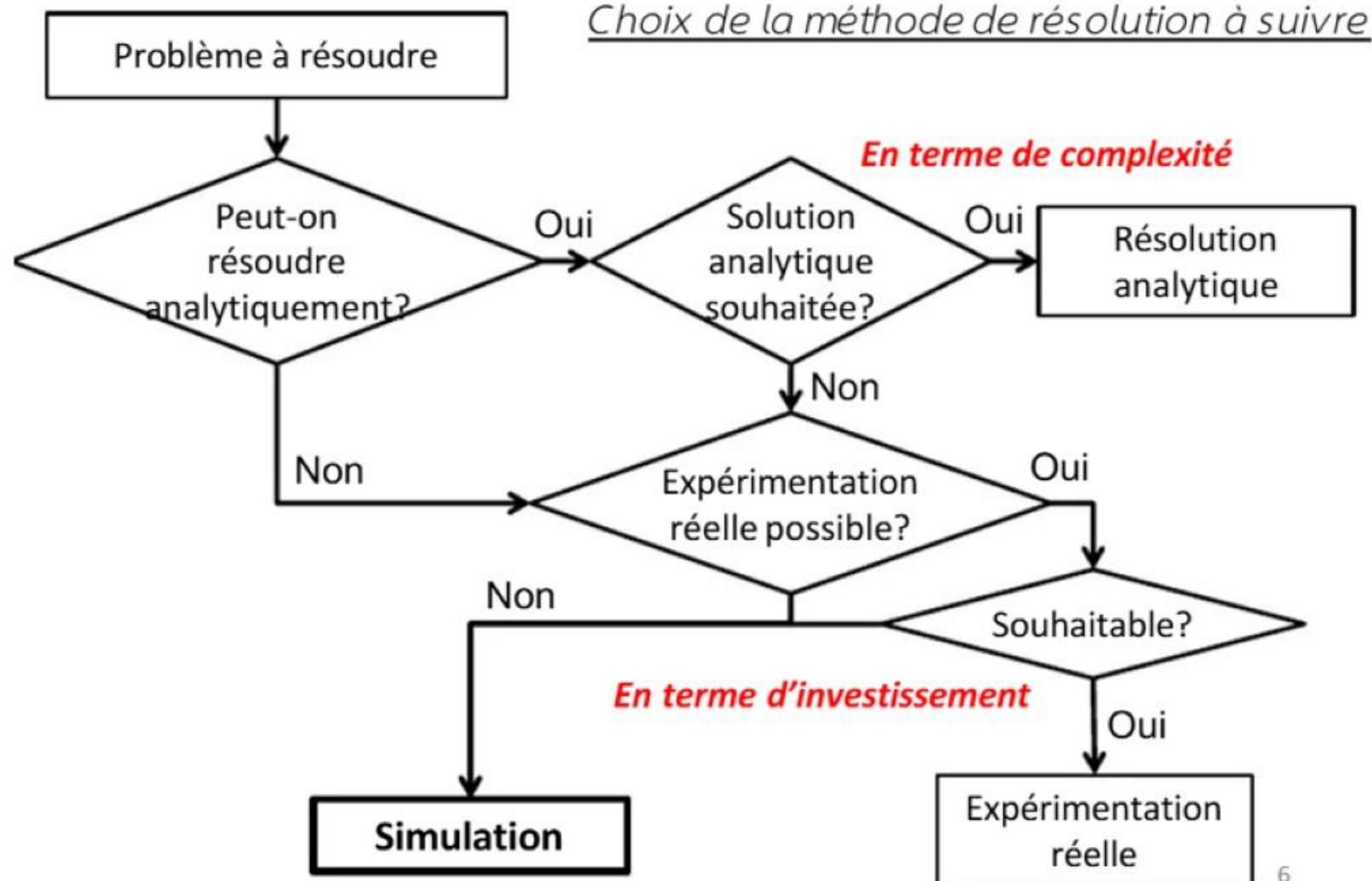
Système 4 : Prévision de la propagation d'une épidémie

Système 5 : Vente aléatoire de billets pour un concert

Système 6 : Planification des vols d'une compagnie aérienne

Système 7 : Trafic routier dans une ville à l'heure de pointe

Quand simuler ?



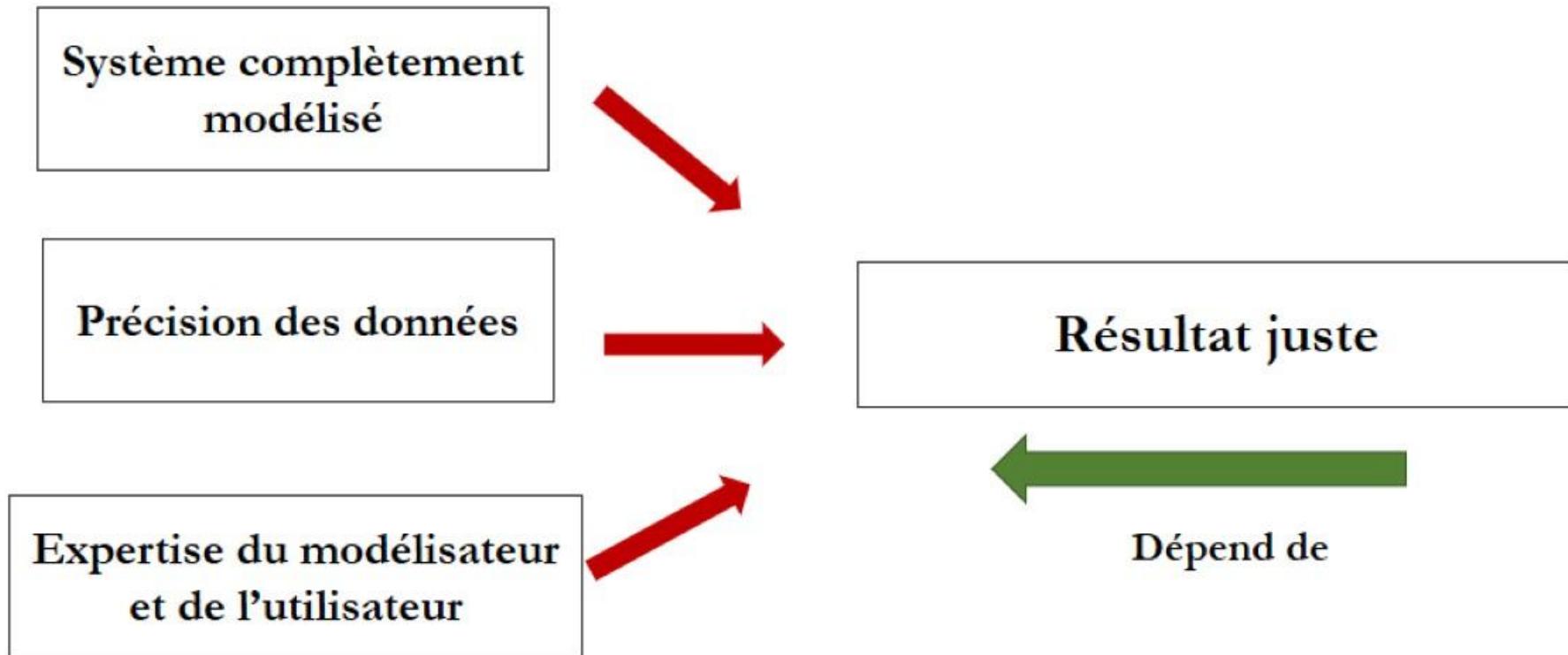
Avantages de la Simulation

- De nouvelles politiques et procédures peuvent être explorées sans perturber le fonctionnement en cours du système réel.
- De nouveaux designs peuvent être testés sans engager de ressources pour leur acquisition.
- Le temps peut être compressé ou étendu pour accélérer ou ralentir le phénomène étudié.
- Des insights peuvent être obtenus sur les interactions entre les variables et sur celles qui ont le plus d'impact sur la performance du système.
- Permet d'obtenir des réponses à des questions de type "Que se passerait-il si...".

Limites de la simulation

-
- Optimisation des performances d'un système Que la reproduction du comportement du système modélisé
 - Proposition de solutions aux problèmes considérés Obtention d'indications à partir desquelles des solutions peuvent être déduites

Limites de la simulation



Niveau de détail qu'il faut atteindre au cours de la modélisation pour que le modèle soit représentatif de la réalité

Objectif de la simulation

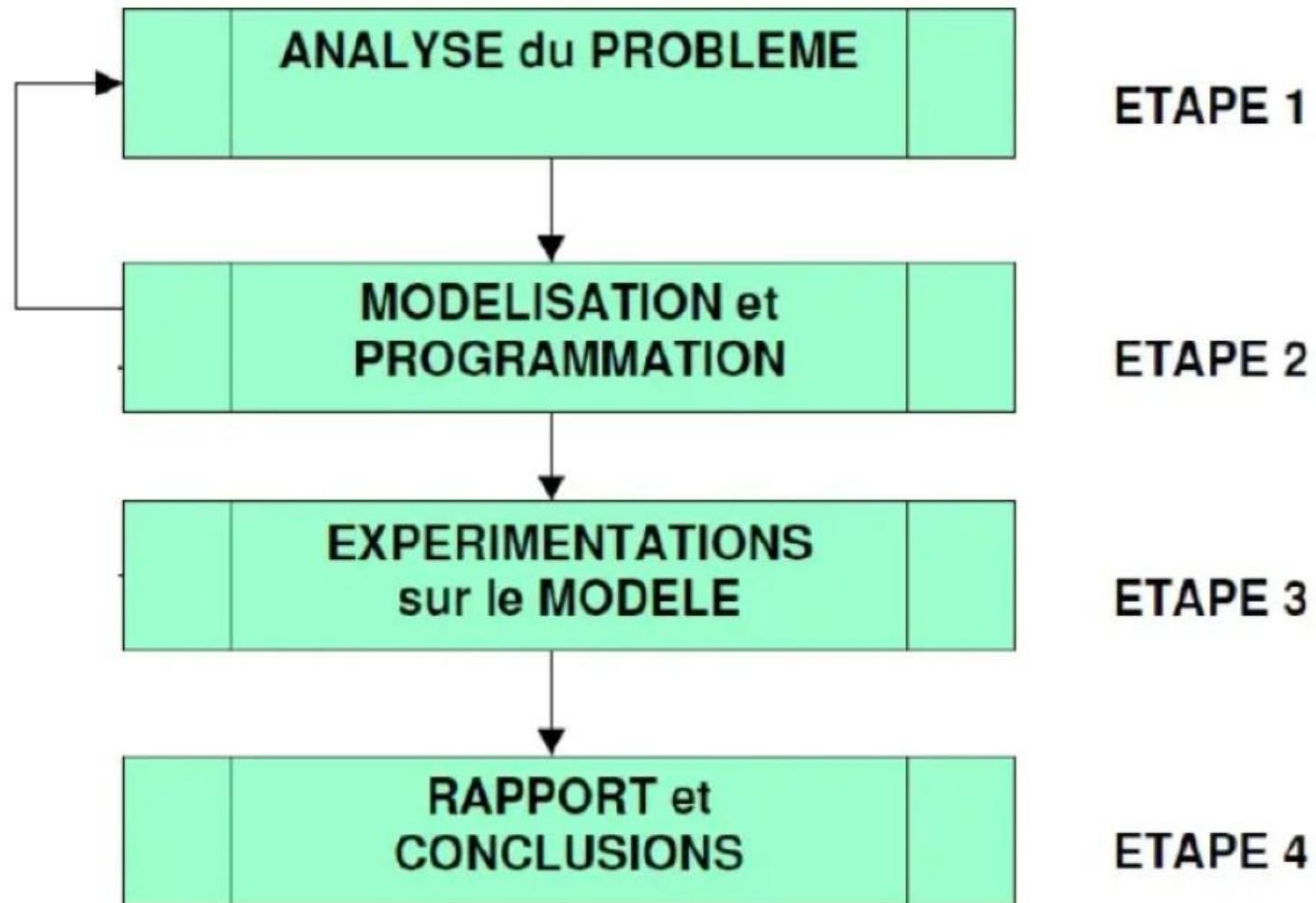
- . Mieux connaître le comportement du système au niveau :
 - Structure physique
 - Sous-système décisionnel
- . Évaluer ses performances

→ Aider les décideurs dans leurs choix

Applications de la modélisation et de la simulation

- Engineering
- Healthcare
- Business and Economics
- Environment
- Military
- Education and Training
- Industry
- Logistics and supply chain management
- Transportation modes and traffic
- Facility placement problems
- Communication networks
- And many more!

5. Méthodologie de conduite d'une simulation

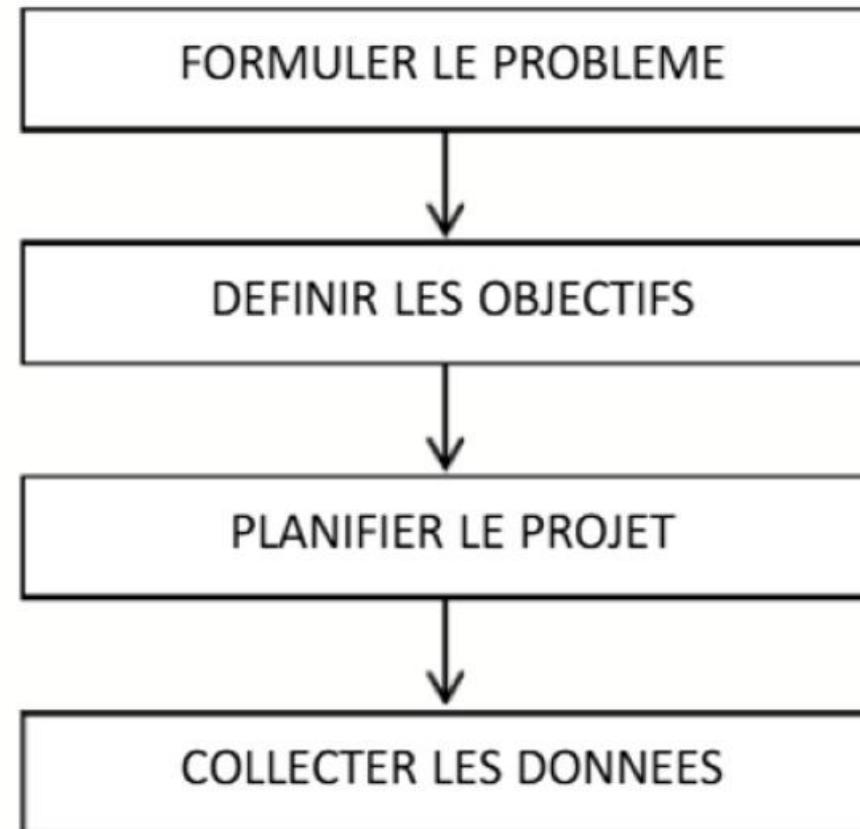


5. Méthodologie de conduite d'une simulation

Etape 1 : Analyse du problème

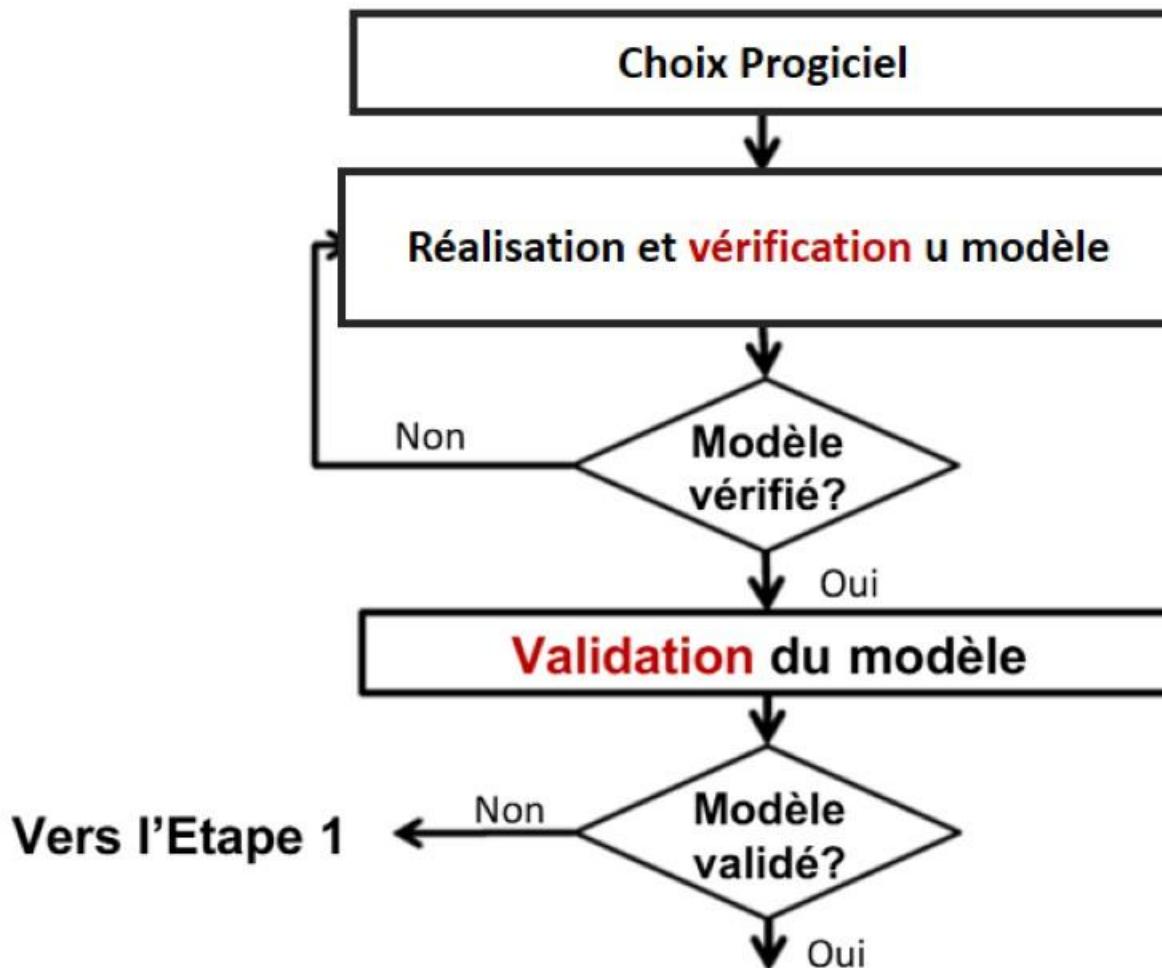
Déterminer les indicateurs de performance qui vont permettre de vérifier si l'on atteint les objectifs que l'on s'est fixé.

Fournir des données numériques au modèle.



5. Méthodologie de conduite d'une simulation

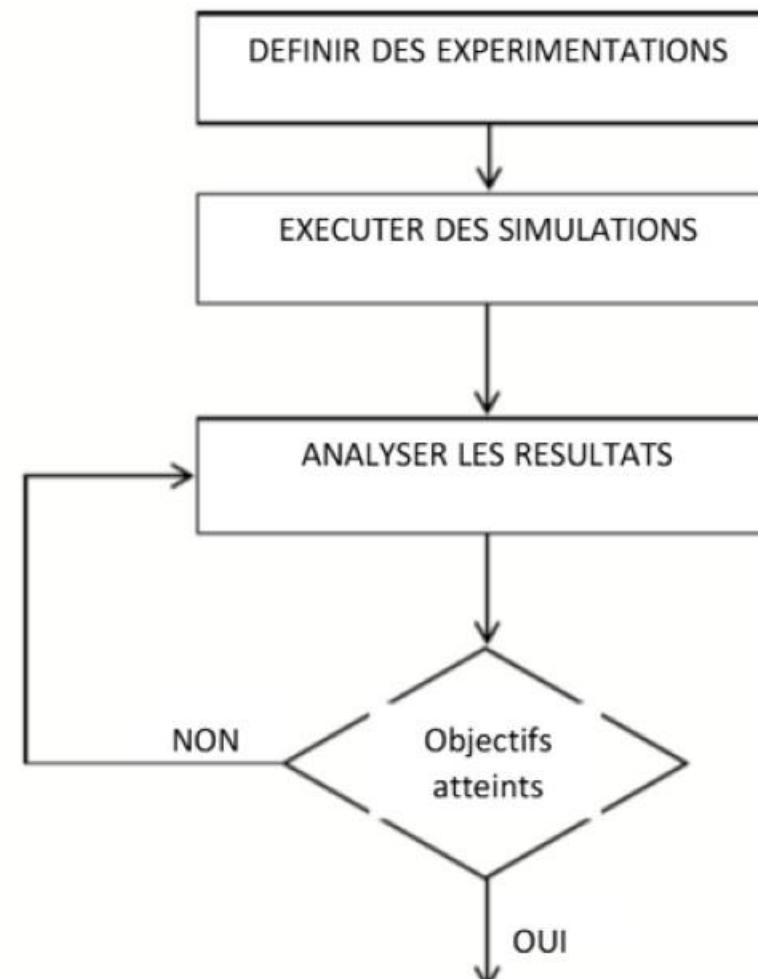
Etape 2 : Modélisation et programmation



5. Méthodologie de conduite d'une simulation

Etape 3 : Expérimentation sur le modèle

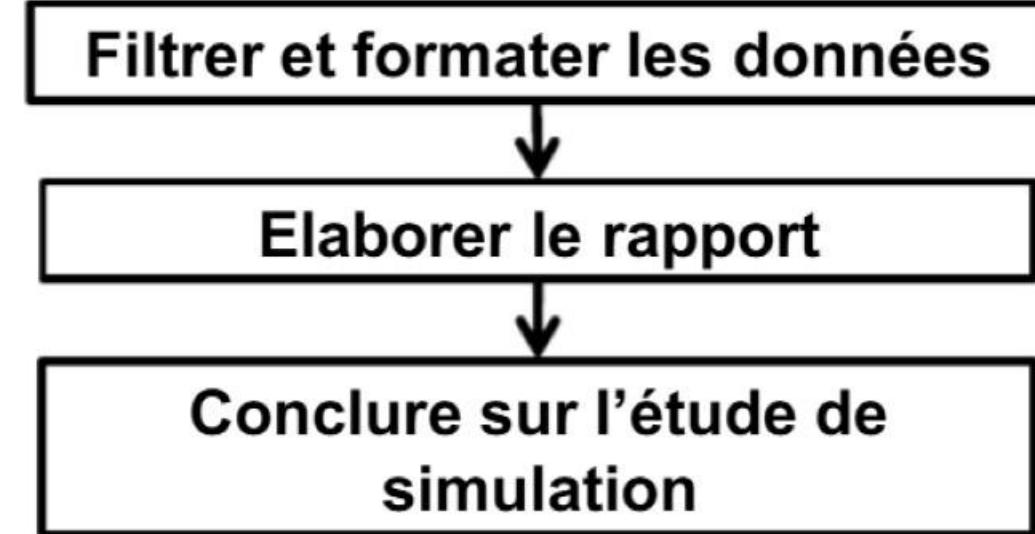
Un scénario ou une expérimentation se caractérise donc par un jeu de données qui varie à chaque itération du processus expérimental.



5. Méthodologie de conduite d'une simulation

Etape 4 : Rapport et conclusions

- Compiler les sorties.
- Présenter des graphiques ou des tableaux pour visualiser les tendances.
- Documenter les hypothèses, les paramètres utilisés et les limites du modèle.
- Évaluer si les objectifs de la simulation sont atteints.
- Proposer des recommandations.
- Identifier les incertitudes ou les améliorations possibles pour de futures simulations.



6. Composants clés d'un modèle de simulation

- Entités
- Attributs
- Variables
- Ressources
- Événements
- Conditions de début et de fin

Options d'analyse :

- **Estimation éclairée** Effectuer des estimations informées basées sur les connaissances existantes.
- **Théorie des files d'attente** Analyser les files d'attente et leurs dynamiques.
- **Simulation mécaniste** Modéliser les processus physiques en se basant sur les lois de la physique.

Concepts clés en simulation

❑ Simulation manuelle basée sur les événements

- Simuler manuellement le comportement d'un système en suivant les événements dans l'ordre où ils se produisent.
- Permet une compréhension approfondie de la manière dont un modèle de simulation fonctionne sans utiliser d'ordinateur.
- Exemple : simuler une file d'attente à un guichet de billetterie.

Concepts clés en simulation

❑ Simulation orientée par événements et par processus

Simulation orientée par événements:

- Événements discrets qui modifient l'état du système à des moments spécifiques dans le temps.

Simulation orientée par processus:

- Modélise le flux des entités à travers le système.
- Chaque entité (comme un client) suit sa propre chronologie alors qu'elle passe par différentes étapes dans le système.

Concepts clés en simulation

□ Simulation avec des tableurs:

- Utilisation de logiciels de tableur comme Excel pour modéliser des systèmes simples. Cela se fait à travers des formules, des fonctions aléatoires et des itérations manuelles.

7. Processus de Modélisation

- Le **modèle conceptuel** est une représentation simplifiée du système réel.
- Le **modèle descriptif** est une formulation du modèle conceptuel par une description symbolique.
- Le **modèle informatique** est construit par une implémentation informatique du modèle descriptif.
- La **qualification** examine si le niveau d'abstraction utilisé pour concevoir le modèle conceptuel est adéquat pour représenter le système étudié dans les limites du domaine d'application visé.

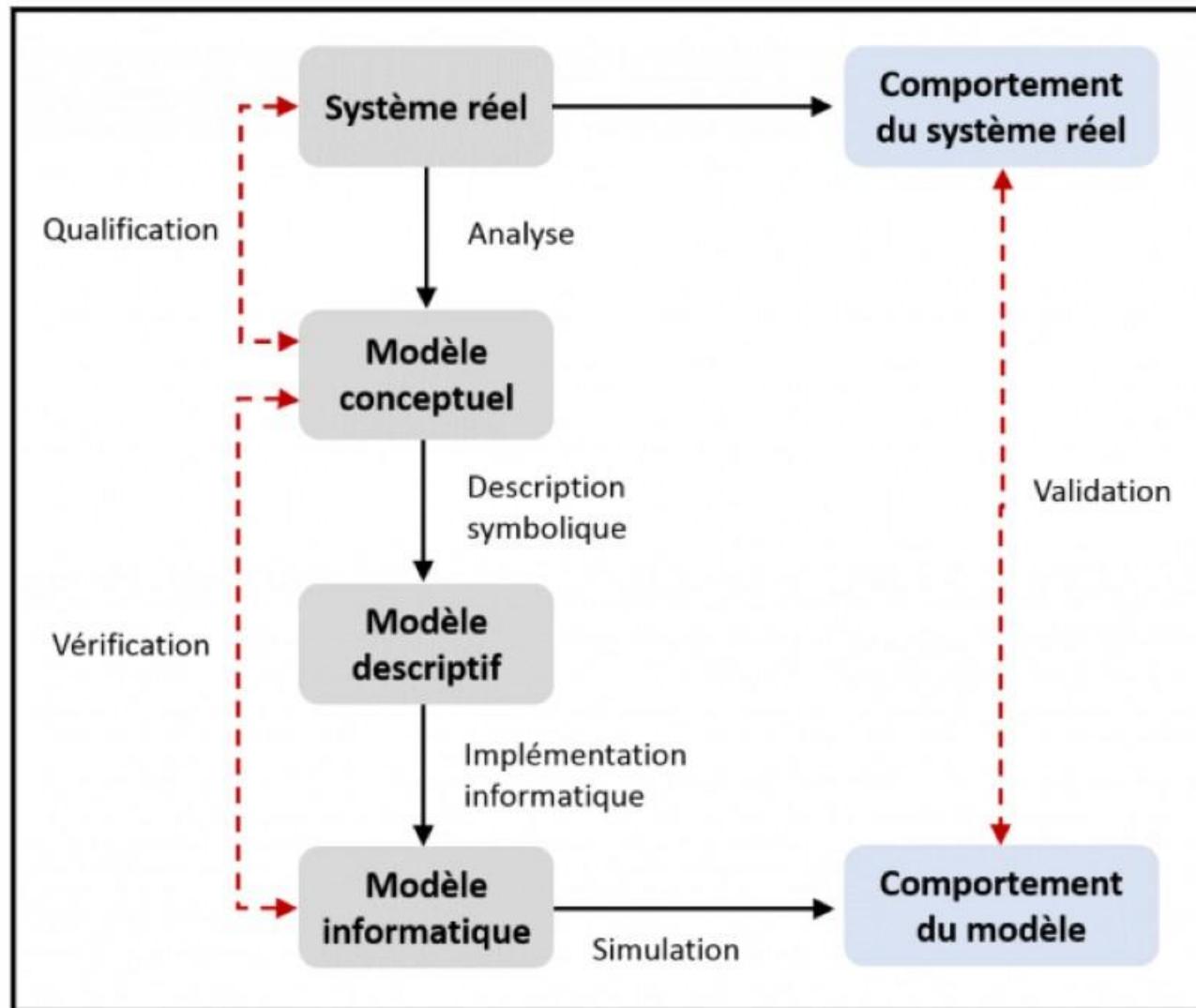


Figure adaptée de Schlesinger *et al.* (1979) et Parrott (2003)

Exemple

□ Usine de fabrication de pièces

- Imaginons une petite usine qui fabrique des pièces métalliques pour l'automobile. L'usine dispose d'une machine principale qui produit 10 pièces par heure en moyenne, mais des pannes aléatoires peuvent interrompre la production. L'objectif est d'estimer le nombre total de pièces produites sur une journée de travail (8 heures) et d'optimiser le processus pour minimiser les interruptions.

Exemple

□ Usine de fabrication de pièces

Questions

1. Quel est le problème principal à résoudre dans cette usine ?
2. Quels paramètres initiaux peuvent être définis pour la simulation ?
3. Quelle information clé voulez-vous obtenir à la fin de la simulation ?
4. Quelles sont les composants clés du modèle ?
5. Le modèle de simulation devrait-il être stochastique, déterministe, discret ou continu ?

Types de Simulation

1. Monte Carlo simulation



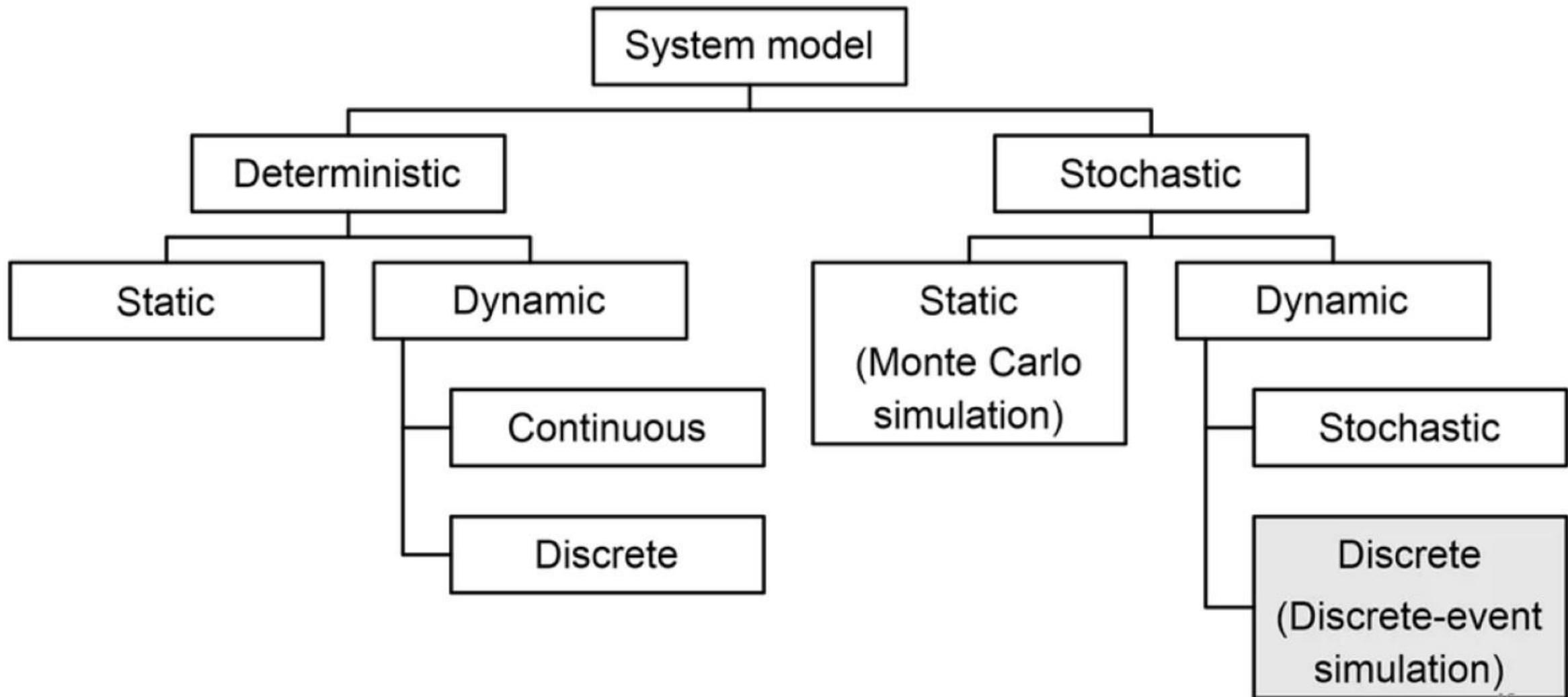
2. Trace-driven simulation

3. Time-stepped simulation

5. Continuous simulation

4. Discrete-event simulation

Types de modèles et de simulations



Types de Simulation

□ Monte Carlo simulation

- Simulation statique (sans dépendance temporelle).
- Modéliser et analyser l'incertitude des systèmes.
- Générer des variables aléatoires dans un modèle probabiliste et exécuter plusieurs simulations pour estimer l'éventail des résultats possibles.

Types de Simulation

□ Monte Carlo simulation

X Coût de calcul

X Précision

✓ Flexibilité

✓ Gestion des incertitudes

✓ Visualisation

Types de Simulation

□ Trace-Driven Simulation

- Utilise des données historiques réelles (traces).
 - Utilisée pour évaluer ou optimiser des algorithmes de gestion des ressources (basés sur des charges réelles) : Gestion de la pagination, Analyse des caches,...

Types de Simulation

□ Trace-Driven Simulation

- Exemple : évaluer un nouvel algorithme d'ordonnancement de disque pour un système de stockage → Collecter une trace à partir d'un système réel sur une période donnée → Permet d'évaluer comment le nouvel algorithme fonctionnerait avec des charges réelles, en comparaison avec l'algorithme actuel.

Types de Simulation

□ Trace-Driven Simulation

✓ Crédibilité

✓ Réalisme

✓ Reproductibilité

✓ Similitude avec le système réel

✓ Comparaison équitable

✗ Dépendance aux traces

✗ Stockage et complexité

✗ Manque de flexibilité

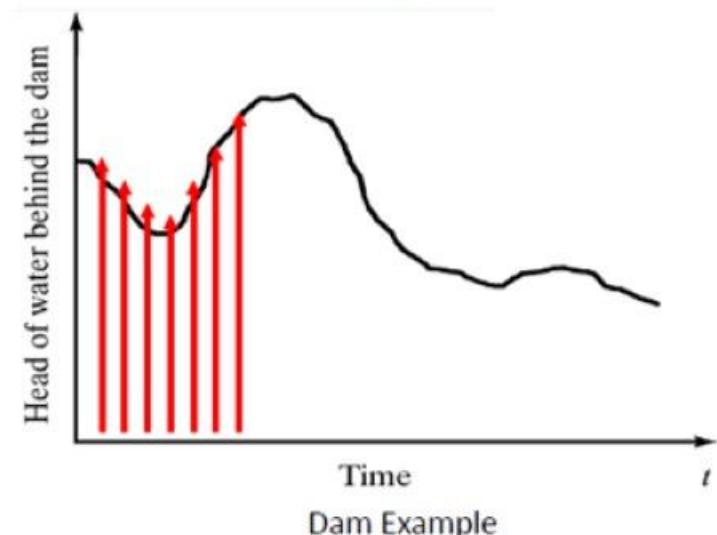
Difficulté dans la collecte
✗ des traces

Difficulté à modifier la
✗ charge de travail

Types de Simulation

□ Time-stepped simulation

- L'état du système est mis à jour à des intervalles de temps réguliers et fixes.
- Le système est ensuite analysé ou mis à jour à chacun de ces points temporels en fonction des interactions et des règles définies dans le modèle.
- Intervalles de temps fixes
- Mises à jour de l'état
- Déterministe ou stochastique
- Simple à implémenter



Types de Simulation

□ Time-stepped simulation



Simplicité



Prédicibilité



Contrôle de la granularité



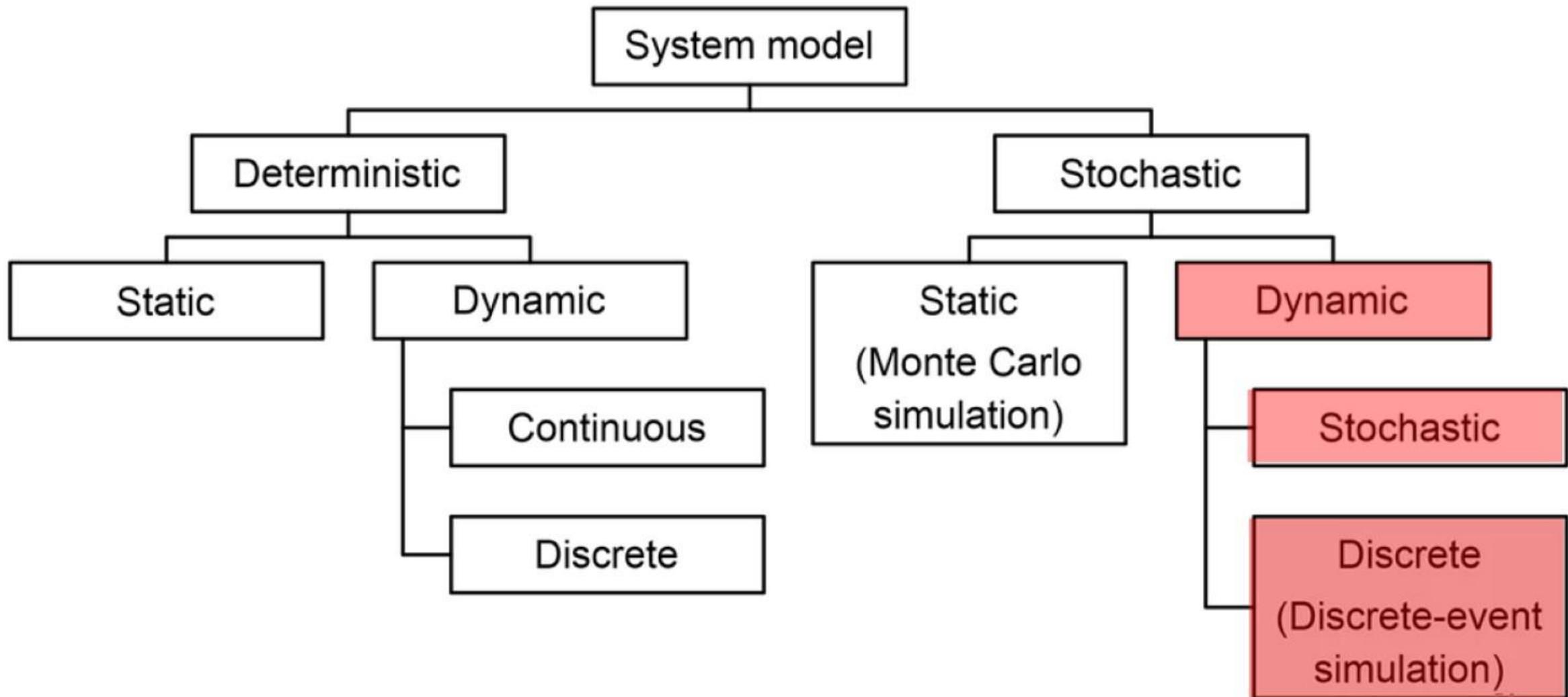
Échantillonnage uniforme

Résolution temporelle fixe
des traces



Précision versus efficacité

Types des Modèles et Simulation



Types de Simulation

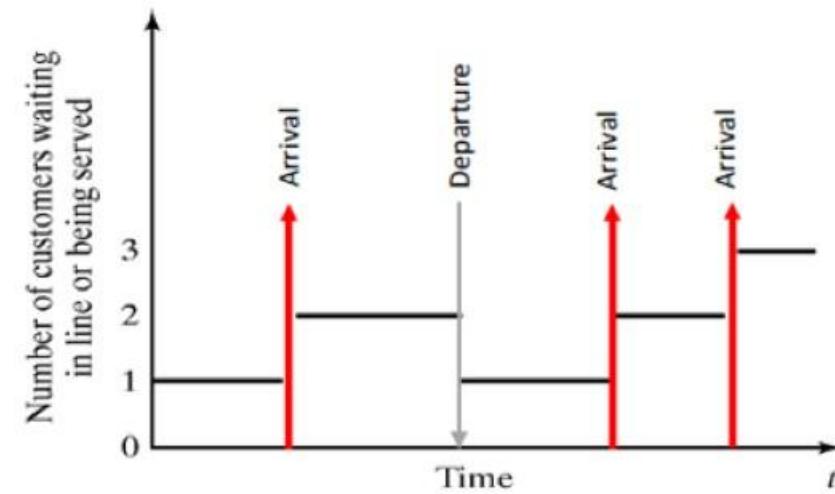
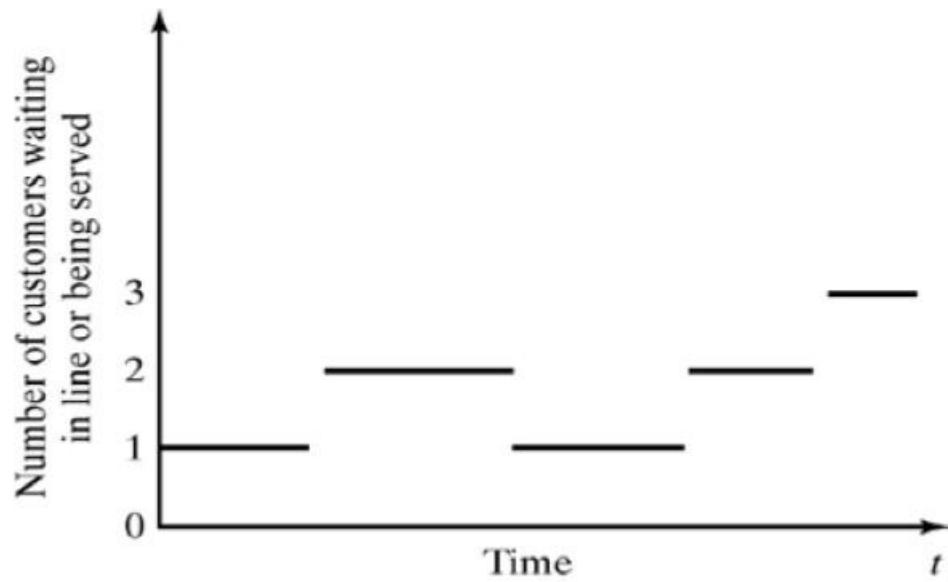
□ Discrete-event simulation

Un modèle de simulation avec trois caractéristiques :

- Stochastique :
→ Certaines variables du modèle de simulation sont aléatoires.
- Dynamique:
→ L'état du système évolue au fil du temps
- À événements discrets :
→ Les changements dans l'état du système se produisent à des instants précis dans le temps.

Types de Simulation

□ Discrete-event simulation



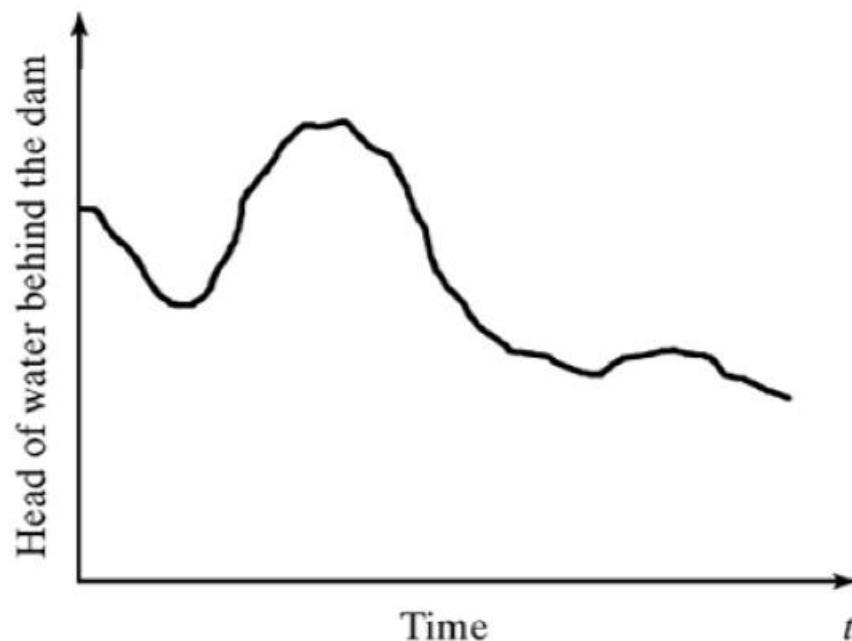
Restaurant Example

Types de Simulation

□ Continuous Simulation

L'état du système change de manière continue au fil du temps

Exemple : Niveau d'eau dans la rivière Bow



Références

Schlesinger, S., Crosbie, R. E., Gagne, R. E., Innis, G. S., Lalwani, C. S., Loch, J., . . .
Bartos, D. (1979). Terminology for model credibility. *Simulation*, 32(3), 103-104

Law, A. M. et Kelton, D. W. (1991). Simulation modeling and analysis. New York:
McGraw-Hill.