

Master I 2021/2022

Ingénierie des Logiciels Complexes (ILC)

*Simulation des
Systèmes Complexes*

Par : F. SAHEB

Email: sahebt2002@yahoo.fr

Plan

1. Introduction aux systèmes complexes.
2. Principes de modélisation
3. Principaux mécanismes de simulation.
4. Principes de validation et de vérification du processus de modélisation et de simulation des systèmes complexes.
5. Systèmes Multi agents

Simulation de systèmes complexes

- La simulation est une technique qui tend à reproduire le comportement d'un système complexe.
- Opérant à partir d'un modèle, la simulation peut être définie par la manipulation dans le temps et parfois dans l'espace des éléments du modèle afin d'en observer:
 - l'évolution,
 - les interactions internes et externes.

- D'un point de vue informatique, la simulation se met en œuvre à partir d'une implémentation correspondant à l'informatisation, dans un langage quelconque, d'un modèle de simulation (opération de laquelle résulte un modèle informatique).

Motivations

- **La simulation informatique, comme toute autre méthode de résolution et d'analyse, possède à la fois des avantages et des inconvénients.**
- **L'argumentaire classique présente fréquemment la simulation comme une bonne alternative pour l'étude de certains systèmes comportant:**
 - **des risques (étude du comportement d'une centrale nucléaire lorsqu'un des noyaux explose),**
 - **ou dont l'étude serait trop coûteuse en temps ou en argent (test aérodynamique d'avion),**
 - **ou encore humainement trop compliquée (calculs météorologiques).**

Le temps

- La reproduction par la simulation informatique de phénomènes réels, lesquels intègrent une dimension temporelle, implique la prise en compte de cette dimension temporelle comme étant un élément fondamental de l'exécution.
- Cette composante temporelle appelée temps virtuel ou temps simulé n'est pas en règle générale lié au temps physique.

Avantages de la simulation

- **Cette absence potentielle de contrainte vis-à-vis du temps réel dans lequel évolue le système complexe étudié permet au programme de simulation de faire évoluer le temps simulé avec une vitesse appropriée:**
 - à la fois à l'observation du comportement,
 - et à la fois adaptée aux capacités de la simulation numérique.

- **Ainsi, un autre avantage de la simulation est:**
 - sa capacité de paramétrer le comportement d'un système complexe dans le temps et dans l'espace par un mécanisme de compression temporelle.

Ce mécanisme permet de percevoir une évolution très longue dans un intervalle de temps très petit, éventuellement à l'inverse par une expansion temporelle, lorsque le temps réel d'évolution est très rapide, e.g. simulation des trajectoires suivies par des ions au milieu de l'électro-aimant d'un cyclotron.

Classes de simulation

- La considération des nombreuses et des différentes caractéristiques des systèmes entraîne différents types de classification des simulations.
- En effet, de manière générale, les classes de simulation se réfèrent au type du système (ou modèle) simulé.
- Une simulation peut ainsi être:
 - statique,
 - stochastique,
 - dynamique,
 - déterministe, etc.

- Une façon de classer les types de simulation de manière exclusive en considérant l'évolution du système représenté par rapport au temps.
- Ainsi, il existe deux principaux types de systèmes :
 - **Les systèmes statiques** dont l'état ne dépendent que des paramètres courants. De tels systèmes réagissent instantanément. Ils ne possèdent pas de mémoire puisque le passé n'influence pas l'état présent, ils sont atemporels ;
 - **Les systèmes dynamiques** dont l'état à un instant donné dépend non seulement des paramètres courants mais également des états passés.

Évolution des systèmes dynamiques

- Les évolutions temporelles de ces systèmes dynamiques peuvent s'opérer de deux manières :
 - de façon continue, auquel cas les variations d'état interviennent sans interruption dans le temps, ou
 - de façon discrète impliquant ainsi des changements d'états se produisant de manière discontinue ou ponctuelle.

Autre classification

- Adhérant à cette dualité, comportement statique ou comportement dynamique, **Ernest Page** postule que la simulation informatique peut être divisée en trois catégories en fonction de l'évolution des états simulés [Page, 1994].
- Notons que dans cette évolution, définie par une transition des états, on appelle événement le changement d'état du système provoqué par l'apparition de données, de messages externes ou, résultant des traitements internes :

Simulation statique

- La simulation de type **Monte Carlo** est une méthode dans laquelle un problème est résolu par un processus stochastique et dans laquelle une représentation explicite du temps n'est pas nécessaire.

Simulation continue

- La simulation continue reproduit le comportement de systèmes dynamiques dans lesquels les variables d'états évoluent sans interruption dans le temps.
- La simulation continue est une technique qui en théorie ne peut être exécutée que par une machine analogique.
- L'utilisation d'un ordinateur numérique tel que nous le connaissons ne peut qu'approcher une simulation continue en considérant des intervalles de temps entre deux événements suffisamment petits pour permettre de ne pas prendre en compte la notion de transition existante entre deux événements.
 - On parle alors de simulation pseudo-continue ou quasi-continue.

Simulation à événements discrets

- La simulation à événements discrets (Discrete Event Simulation : DES) reproduit le comportement de systèmes dynamiques dans lesquels les variables d'états changent à des instants précis dans le temps.
- Le comportement du système, dans cette approche de simulation, est ainsi décrit par une suite de changements d'état où les événements dont on simule l'évolution sont représentés sous la forme d'ensembles dénombrables, modélisés de façon discrète à des unités de temps régulières ou irrégulières dictées par la nature du système.
- Dans ce type de simulation le temps utilisé pour dater les événements produits évolue continûment, toutefois l'état du système ne change que par sauts.

Méthodologies pour la simulation informatique

- De nombreuses méthodologies (quatrième étape de la démarche de modélisation) peuvent être utilisées pour la conception d'un modèle destiné à la simulation informatique.
- On retrouve:
 - la dynamique des systèmes,
 - les modèles à files d'attente,
 - les automates cellulaires,
 - ou encore l'approche agent...

La dynamique des systèmes

- Elle constitue une méthodologie, développée à partir d'équations différentielles, qui est conçue pour la simulation des systèmes continus.
- La dynamique des systèmes tente d'expliquer le comportement des systèmes complexes à partir des actions conjuguées des parties du système en se basant sur un réseau de relations de cause à effet toutes caractérisées par des équations mathématiques (constituées de structures en boucles de rétroaction).

- En opposition à la dynamique des systèmes qui définit une méthodologie adaptée à la simulation de systèmes continus, d'autres méthodologies forment une catégorie de modèles dont le dessein (résolution) et de représenter des systèmes entièrement discrets ou discrétisés (Lorsqu'il est possible de remplacer un continuum espace-temps par un échantillonnage de points discrets répartis, à priori, régulièrement dans le temps).

Approche de simulation par événements discrets

- Cette approche de simulation par événements discrets est le dénominateur commun à toute simulation sur un support informatique numérique.
- Ce type de simulation, qui repose à l'origine sur la théorie des files d'attente, peut ensuite être combiné avec différentes méthodologies de modélisation (agents ou objets, graphes, automates cellulaires, etc.) afin de satisfaire aux besoins et désirs de représentation d'un système complexe.

la simulation à événements discrets (suite)

Deux formes d'expression peuvent décrire la simulation à événements discrets:

- **Par une méthode basée sur la notion d'événements : chaque événement du système est décrit par une condition d'occurrence et par les actions à réaliser lors de son occurrence. Ces actions matérialisent le changement d'état provoqué par l'événement.**

■ **Par une méthode basée sur la notion de processus :**
chaque entité ou composant du modèle est représenté par un processus, qui exécute les actions matérialisant les changements d'états, l'évolution du temps simulé et les interactions avec les autres entités.

– **Les interactions entre les processus peuvent s'effectuer:**

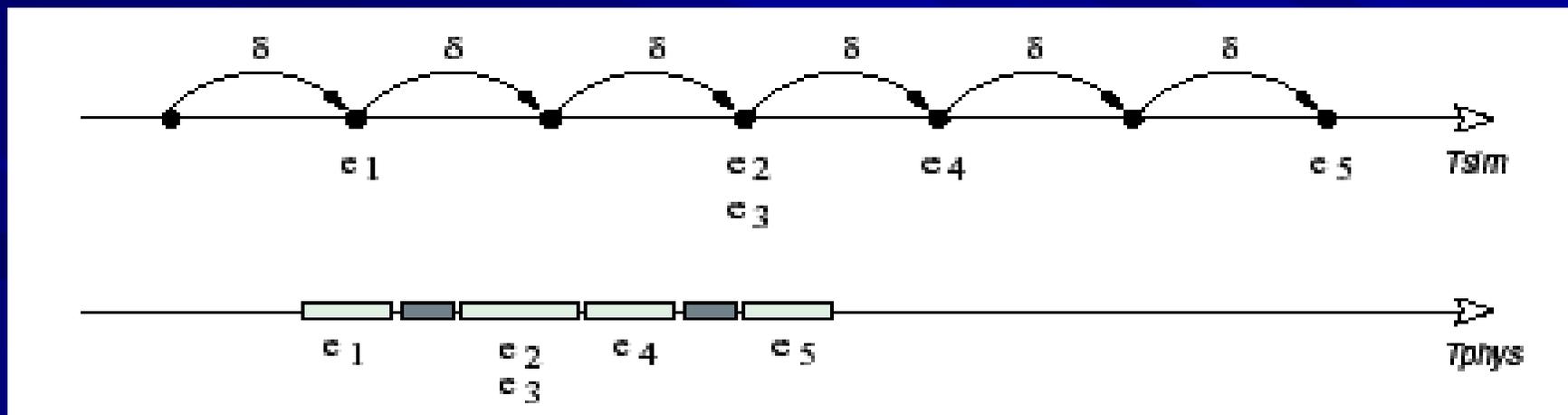
- **soit par ressources partagées accédées par tous les processus,**
- **soit par activation et désactivation directe des processus entre eux,**
- **soit par échange de messages.**

- Dans le mode de fonctionnement classique, chaque processus utilise une liste locale des événements qu'il a à traiter.
- La synchronisation des événements (i.e. le respect de la causalité) est alors assurée par un ordonnancement vis à vis de l'horloge physique de l'ordinateur.
- Lorsque le mode de fonctionnement exploite une liste globale, celle-ci est représentée par une variable partagée dont l'accès par les différents processus est synchronisé.

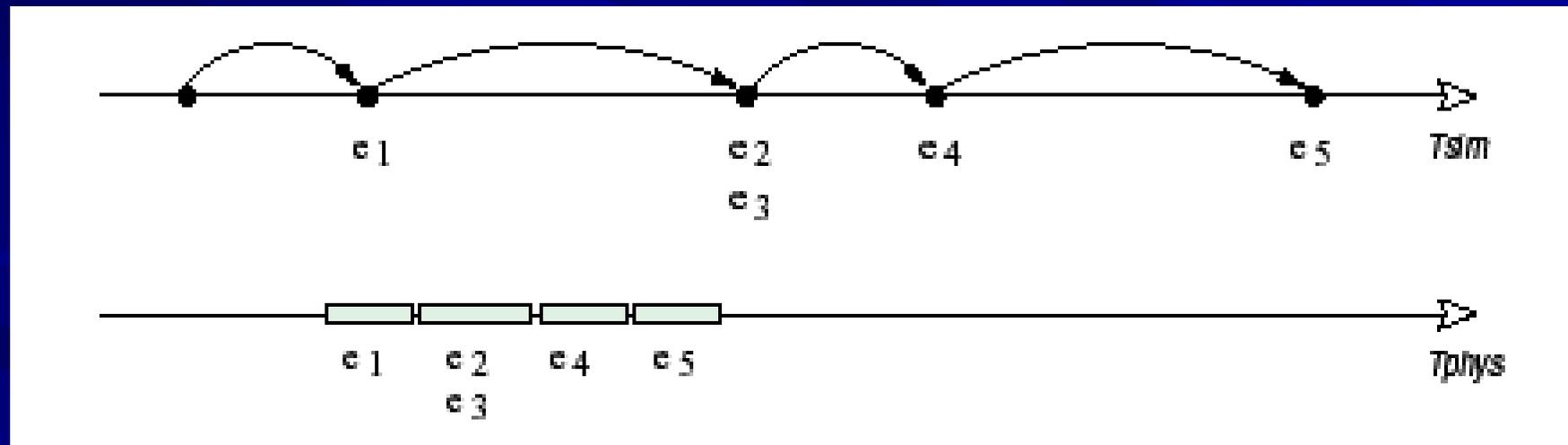
méthodes de traitement des événements

Deux méthodes sont traditionnellement employées: la simulation dirigée par le temps et la simulation dirigée par les événements.

- La simulation dirigée par le temps (time-driven) est discrétisée par intervalles de temps unitaires et entretient une horloge globale représentant le temps simulé. Cette horloge avance par incréments fixes δ appelés pas qui sont de taille arbitraire mais constante. A chaque pas de l'horloge, le simulateur consulte la liste d'événements à la recherche d'événements ayant pour date d'occurrence la date courante de simulation T_{sim} .



- La simulation dirigée par événement, s'il possède un événement e_i à simuler à cette période, il exécute l'événement, autrement le simulateur passe au pas temporel suivant. Remarquons que dans T_{sim} les événements sont souvent considérés comme instantanés (à la date d'occurrence) alors que dans T_{phys} ceux-ci nécessitent un intervalle de temps pour être exécutés.



Les SMA

- Les systèmes multi-agents constituent une méthodologie de modélisation qui convient particulièrement à la simulation numérique de systèmes complexes.
- Les systèmes multi-agents sont caractérisés par un environnement comprenant un ensemble d'entités passives et un ensemble d'entités actives (agents) dont la définition et la décomposition en sous-ensembles organisés permet de reproduire les organisations hiérarchiques des systèmes complexes.

- Cette approche est basée sur la compréhension des entités du système, situées dans leur environnement dont elles ont une vision partielle, sont dotées de comportements autonomes leur permettant d'atteindre des objectifs.
- L'approche agent intègre la notion d'émergence et considère que l'action et l'interaction sont les éléments moteurs de la structuration d'un système dans son ensemble (rejoint en cela l'approche systémique).
- La décentralisation des processus ou des connaissances au niveau d'éléments actifs est une des caractéristiques fondamentales des modèles à agents.

- La plupart des systèmes réels sont naturellement distribués, par décentralisation, réduction du couplage entre les éléments ou les composants, ou par le besoin de prise de décision locale.
- Remarquons alors que la méthodologie agent convient particulièrement à une exécution distribuée de la simulation. En effet, elle permet de reproduire les interactions, dont la complexité est intégrée dans chacun des composants, entre les différents niveaux d'abstraction en termes de perception et de communication.
- A ce propos Ferber précise que les systèmes multi-agents tentent d'appréhender le problème de l'interaction entre entités individualisées de manière générale et abstraite, considérant que les systèmes distribués ne sont qu'une application ou qu'une réalisation possible et particulièrement importante de ce concept général.