

*Master I      2021/2022*

*Ingénierie des Logiciels Complexes (ILC)*

*Modélisation des  
Systèmes Complexes*

Par : F. Saheb

Email: [sahebt2002@yahoo.fr](mailto: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
6. Conclusion.

# Modélisation de systèmes complexes

- Le modèle est au sens platonicien le paradigme, la forme idéale sur laquelle les existences sont réglées.
- Tout modèle est constitué:
  - d'une part de la description de la structure du système
  - et d'autre part de la description des fonctionnements et des dynamiques qui modifient cette structure.

Un modèle dont l'objectif est la formalisation et la compréhension d'un système peut être défini par trois points essentiels:

- La représentation: un modèle est avant tout une représentation du système étudié ;
- La ressemblance: un modèle doit ressembler au système représenté ;
- La simplification: un modèle constitue une simplification du système.

## Conclusion:

- Issus d'un mécanisme de schématisation et de simplification d'un phénomène de la réalité, les modèles sont par définition des approximations et donc souvent imparfaits.
- George Box a eu à ce sujet une réflexion plus catégorique : ***all models are wrong, some are useful.***
- De ce fait, il ne faut pas confondre nos représentations avec le système lui-même car ceux ci ne représentent que des visions parcellaires.

- L'essentiel dans l'étape de modélisation est de ne pas confondre les représentations (modèles) avec le monde lui-même (le système), ceux-ci fournissent un instrument dans la production de la connaissance et permettent d'analyser différentes situations dynamiques (dont les résultats peuvent être confrontés à la réalité).

# Approches analytiques versus systémiques

- L'approche analytique, née de la démarche cartésienne et
- l'approche systémique, issue de la cybernétique (science des interactions entre les mécanismes pour la réalisation des robots programmables à apprentissage par exp) et de la théorie des systèmes,
- Elles sont fondées sur des postulats (principes considérés comme vrais) épistémologiques (pour déterminer leur origine, leur valeur, leur portée) différents et définissent deux façons de percevoir la réalité (le système).
- Ces approches utilisent des méthodologies qui leur sont propres pour construire des modèles et abordent l'étude d'ensembles possédant des niveaux de complexité divers.

■ D'après George Henry Lewes, dans Problems of Life and Mind (1875),

- il existe des phénomènes dits résultants, qui peuvent être abordés par une méthode analytique,
- et des phénomènes dits émergents, qui ne peuvent être compris à partir de la seule étude de leurs éléments constituants.

- L'émergence de phénomènes nouveaux, non prévisibles d'un point de vue strictement analytique ne peut être étudiée correctement que par une approche holistique considérant les interactions entre les phénomènes comme étant l'élément essentiel d'étude (phénomènes vus comme des totalités), en opposition au réductionnisme (analytique) qui préconise que le tout peut être décomposé et analysé en termes de ses composantes considérées comme fondamentales.

## **Conclusion:**

On parle alors de méthode systémique, seule apte à percevoir toute la dynamique des systèmes complexes par leurs rétroactions et leurs émergences.

- **Aristote (-384 à -322)** déjà légifère sur la distinction entre le réel et le possible en établissant une différence entre phénomènes réels et évaluations virtuelles.
- Il se pose alors la question: toute évaluation des phénomènes est-elle déterministe à partir des conditions initiales ou bien y a-t-il des phénomènes spontanés.
- Cette question présuppose l'impossibilité de parvenir à comprendre les systèmes complexes sans avoir préalablement isolé les diverses parties qui les composent en laissant de côté les relations pouvant exister entre deux parties.

# Les bases d'une analyse analytique

Partant de cette approche héritée d'Aristote, Descartes posera plus tard les bases d'une modélisation analytique en énonçant (discours de la méthode) les quatre préceptes d'une approche rationnelle destinée à analyser, comprendre et contrôler la réalité :

- Ne jamais concevoir une chose comme étant vraie, sans la connaître telle ;
- Diviser chaque difficulté rencontrée en autant de parcelles nécessaires à leur compréhension ;
- Analyser en allant du plus simple vers le plus complexe ;
- Inventorier de façon complète afin de ne rien omettre.

- L'approche analytique (cartésienne) est une démarche descendante qui vise à expliquer la nature des systèmes en descendant jusqu'aux niveaux d'organisation sous-jacents desquels une connaissance exhaustive est possible.
- Dans l'étude de la dynamique, l'approche analytique adopte ensuite un sens ascendant en élaborant la connaissance du système par additivité des parties.
- Il s'agit finalement d'une démarche sommative qui ne prend pas en compte toute la nature implicite de la complexité et des interactions entre les parties.
- Cette approche repose sur une démarche rigoureuse mais est néanmoins réductionniste car elle réduit la complexité des systèmes à une connaissance basée sur une agrégation des connaissances plutôt que comme un tout.
- L'approche analytique a par conséquent tendance à déduire de l'étude d'un seul élément appartenant à un ensemble, des lois considérées applicables à la globalité du système.

# conclusion

- Certains doutes émis sur l'efficacité du précepte réductionniste de l'approche analytique s'amplifient avec la prise en compte du phénomène de complexification des ensembles qui fait ressortir, avec acuité, les limites de cette méthode pour l'étude des systèmes.
- Ashby présente l'approche analytique comme étant le plus souvent impropre à l'étude des systèmes complexes.

- **Daniel Durand** précise que la prise de conscience de la complexité et de l'incertitude des systèmes réels conduit à la diffusion lente mais inéluctable du paradigme (ou modèle) systémique, seul permettant de prendre en considération et de traiter de façon adéquate, non seulement complexité et incertitude, mais aussi ambiguïté, ou hasard.
- Cette approche systémique se présente souvent comme la science du complexe de laquelle le concept moderne de système s'est peu à peu construit au cours du vingtième siècle en provenant de différents domaines d'études scientifiques.

# Approche systémique

- **Daniel Durand** précise que la prise de conscience de la complexité et de l'incertitude des systèmes réels conduit à la diffusion lente mais inéluctable du paradigme (ou modèle) systémique, seul permettant de prendre en considération et de traiter de façon adéquate, non seulement complexité et incertitude, mais aussi ambiguïté, ou hasard.
- Cette approche systémique se présente souvent comme la science du complexe de laquelle le concept moderne de système s'est peu à peu construit au cours du vingtième siècle en provenant de différents domaines d'études scientifiques.

- L'approche systémique a pour but:
  - d'essayer de rendre compte de la multiplicité des facteurs permettant d'expliquer et de comprendre le phénomène étudié en prenant en compte l'imbrication et l'interaction des éléments en fonction de leur environnement.
  - de chercher donc à privilégier la connaissance des relations et des interactions entre les éléments qui constituent un système complexe.
  
- En outre, ces interactions entre les éléments sont systématiquement restituées quant à leur signification par rapport à la globalité du système considéré.

- Cette approche postule qu'il est impossible d'atteindre la compréhension de l'ensemble comme un tout par l'étude exclusive de ses parties et focalise donc plus l'attention sur les propriétés constitutives et les facteurs émergents d'un système.

# Préceptes pour la systémique

- En opposition aux préceptes cartésiens de l'approche analytique énumérés précédemment, Le Moigne définit quatre préceptes pour l'approche systémique qu'il qualifie de préceptes du nouveau discours de la méthode.

– à l'évidence	→	la pertinence,
– au réductionnisme	→	le globalisme,
– au causalisme	→	le téléologisme,
– à l'exhaustivité	→	l'agrégativité

- Le précepte de la pertinence consiste à convenir que tout élément considéré se définit par rapport aux intentions implicites ou explicites du modélisateur ;
- Le précepte du globalisme consiste à considérer toujours l'élément étudié comme une partie immergée et active au sein d'un plus grand tout ;
- Le précepte téléologique consiste à interpréter l'élément non pas en lui-même, mais par son comportement et comprendre ce comportement et les ressources qu'il mobilise au regard du projet que le modélisateur attribué à l'élément ;
- Le précepte de l'agrégativité consiste à admettre que toute représentation d'un système est volontairement simplificatrice.

## Joël de Rosnay définit:

- le macroscopie pour symboliser l'outil idéal permettant de mieux comprendre les systèmes complexes.
- Il l'oppose au microscope utilisé pour une analyse de plus en plus fine de l'infiniment petit et
- au télescope utilisé pour analyser l'infiniment grand.

Le macroscopie permet une analyse de l'infiniment complexe.

# Comparaison entre l'approche analytique et l'approche systémique

- **Joël de Rosnay** établit ainsi une comparaison entre l'approche analytique et l'approche systémique.
- L'approche analytique:
  - Isole et se concentre sur les éléments du système en s'appuyant sur la précision des détails.
  - Elle fournit donc des modèles précis et détaillés mais difficilement utilisables dans l'action.
  - Elle conduit ainsi à connaître les particularités et à programmer une action dans son détail au détriment de ses buts.
  - L'approche analytique considère uniquement la nature des interactions et est efficace lorsque ces interactions sont linéaires et faibles.
  - Elle ne modifie qu'une variable à la fois et affirme l'indépendance au regard de la durée ainsi que la réversibilité des phénomènes étudiés.
  - L'approche analytique valide un fait par une preuve expérimentale à l'intérieur d'un cadre théorique et enfin conduit à un enseignement sectorisé par discipline.

## ■ L'approche systémique:

- Relie et se concentre sur les interactions entre les éléments et considère leurs effets en s'appuyant sur la perception globale.
- Elle fournit ainsi des modèles insuffisamment rigoureux pour servir de base de connaissances, mais est utilisable dans l'action et la décision car elle conduit à la connaissance des buts et à l'action programmée par objectifs au détriment d'une clarté des détails.
- Elle modifie des groupes de variables simultanément et introduit la notion de durée et d'irréversibilité.
- L'approche systémique est efficace lorsque les interactions sont non-linéaires et fortes.
- Elle valide par la comparaison du fonctionnement du modèle avec la réalité et enfin conduit à un enseignement pluridisciplinaire.

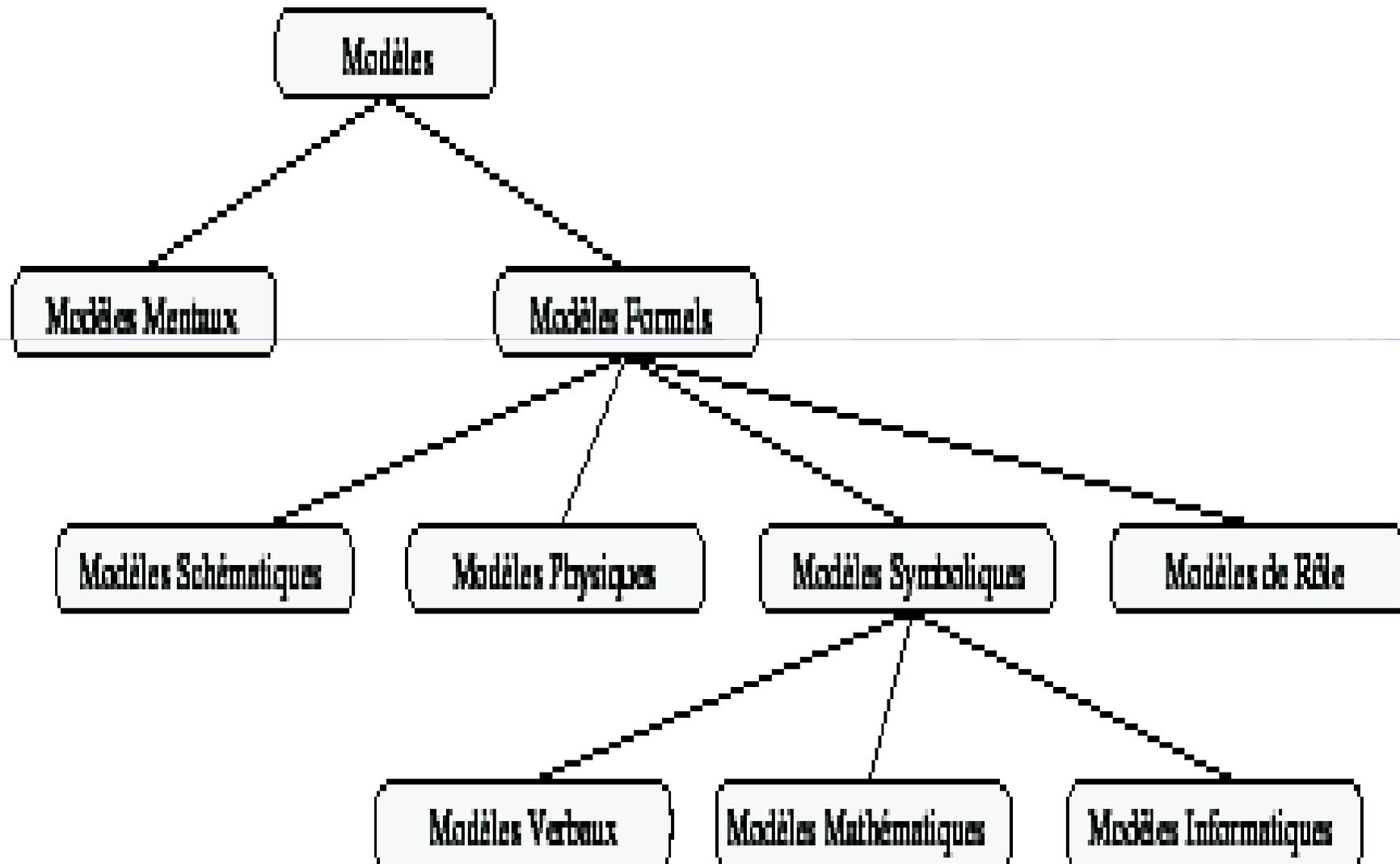
- La comparaison entre ces deux approches de modélisation est résumée dans la table qui suit. Simplifiant à l'extrême ces deux façons de percevoir les systèmes complexes, l'approche analytique est l'étude des éléments et des comportements microscopiques.
- Joël de Rosnay précise que la démarche analytique est indispensable pour fonder la science, mais qu'elle ne suffit pas pour expliquer la dynamique et l'évolution des systèmes complexes (rétroactions, émergences, équilibres, accroissement de la diversité ou auto-organisation).

Approche Analytique	Approche Systémique
Se concentre sur les éléments (isole)	Se concentre sur les interactions entre les éléments (relie)
Considère la nature des interactions	Considère les effets des interactions
S'appuie sur la précision des détails	S'appuie sur la perception globale
Modifie une variable à la fois	Modifie des groupes de variables simultanément
Indépendance de la durée (phénomènes réversibles)	Intègre la durée (phénomènes irréversibles)
Modèles précis et détaillés difficilement utilisables dans l'action	Modèles insuffisamment rigoureux pour servir de base de connaissance, mais utilisables dans la décision et l'action
Approche efficace lorsque les interactions sont faibles et linéaires	Approche efficace lorsque les interactions sont fortes et non linéaires
Conduit à un enseignement par discipline	Conduit à un enseignement pluridisciplinaire
Conduit à une action programmée dans son détail	Conduit à une action par objectifs
La validation des faits se réalise par la preuve expérimentale dans le cadre d'une théorie	La validation des faits se réalise par comparaison du fonctionnement du modèle avec la réalité
Connaissance des détails et buts mal définis	Connaissance des buts et détails flous

# Types de modèles

- Plusieurs formes de représentation des systèmes complexes peuvent être envisagées, au travers de leurs modèles.
- Par exemple, pour Greenberger les systèmes sont tout d'abord répertoriés selon deux approches:
  - les modèles mentaux et
  - les modèles formels.

# Formes d'expression des modèles



# Les modèles mentaux

- Les modèles mentaux sont des représentations informelles d'un système complexe qui ne sont pas exprimés sous la forme d'un langage formel.
- Pour Forrester, les modèles mentaux sont difficiles à communiquer et ne peuvent pas être manipulés de façon efficace car l'esprit humain est incapable de considérer simultanément tous les aspects d'un système complexe.

# Les Modèles formels

Les modèles formels se caractérisent suivant leur propre mode d'expression qui peut être:

- Schématique: représente le système réel à l'aide de dessins, de points, de lignes, de courbes ou de graphiques.

- Les modèles physiques représentent certains aspects des systèmes réels au moyen d'analogies physiques. Les modèles physiques sont construits en utilisant des matériaux tangibles.
- Les modèles de rôles (utilisés en particulier pour les simulations de jeux) représentent les systèmes réels en attribuant des rôles à des personnes.

- Les modèles symboliques peuvent être verbaux, mathématiques ou informatiques.
- Les modèles verbaux représentent les systèmes réels au moyen de narrations écrites ou orales.

□ Les modèles mathématiques représentent les systèmes réels en s'appuyant sur des équations mathématiques. Ils ont souvent l'avantage d'être précis, concis et faciles à manipuler et en principe non ambigus. En dépit de ces avantages, le recours aux représentations mathématiques est limité par le degré trop restreint de maîtrise de la symbolique mathématique.

□ Les modèles informatiques représentent les systèmes réels en recourant aux symboles des langages informatiques. Ceux-ci servent à formuler un algorithme, c'est-à-dire un ensemble de règles qui définissent une séquence d'opérations (i.e. un ensemble d'instructions données à l'ordinateur) représentant un système réel.

Ernest Page classe-lui, les modèles selon quatre dimensions orthogonales:

- **Dimension1:** caractérise la représentation du modèle dans lequel celui-ci est abstrait ou physique. Le modèle abstrait peut être par exemple verbal ou mathématique et le modèle physique est une réplique en général à échelle réduite du système représenté.
- **Dimension2:** caractérise l'objectif sous-jacent du modèle. Le modèle peut être:
  - descriptif auquel cas il décrit le comportement d'un système sans jugement de valeur sur la qualité du comportement.
  - Un modèle normatif lui décrit le comportement d'un système en termes de qualité du comportement et dans lequel un jugement de valeur est apporté.

- **Dimension3:** décrit la présence ou non d'une nature temporelle. Le modèle est ainsi statique ou dynamique.
  
- **Dimension4:** décrit la solution technique de résolution.
  - Un modèle analytique fournit une solution en utilisant des méthodes formelles (e.g. déductions mathématiques).
  - Un modèle numérique (relatif à l'approche systémique) fournit une solution par l'application de procédures informatiques.

# Démarche de modélisation

- L'étude d'un système complexe, par sa transformation en un modèle, peut être abordée de différentes manières en fonction:
  - de ses propriétés,
  - de sa complexité,
  - du type de modèle retenu,
  - des besoins et
  - des techniques disponibles.
- Toutefois, il est concevable de définir une démarche de modélisation dans laquelle un certain nombre d'étapes, pour la construction d'un modèle, sont incontournables.
- Landry présente un exemple de démarche de modélisation constituée de cinq étapes.

# Démarche de modélisation

Spécification

Dynamique

Validation



Description

Conception

# Première étape: Spécification.

- Elle consiste à identifier un problème en situant le système complexe par rapport à son environnement extérieur et ses objectifs de modélisation.
- Dans cette étape de spécification il convient également de préciser de manière informelle les éléments qui vont être modélisés et leurs fonctionnalités.
- Dans une approche systémique la prise en compte de la durée implique de définir la période de temps pour laquelle on désire étudier l'évolution du problème. Lorsque Le Moigne postule que les projets de la modélisation d'un système complexe ne sont pas donnés, mais qu'ils se construisent, il fait référence à cette étape qu'il considère comme la plus importante.

- Pour cet auteur, la tâche la plus importante pour un modélisateur n'est pas de résoudre un problème présumé déjà bien posé mais de formuler le problème pertinent à résoudre : il faut apprendre à résoudre le problème qui consiste à poser le problème. Dans cette optique, la première tâche à accomplir dans une démarche de modélisation est donc de déterminer ce que l'on veut expliquer.

# Deuxième étape: Description.

- Elle consiste à mettre en relief le système étudié en dressant un inventaire formel de l'aspect fonctionnel et structurel.
- L'objectif d'un modèle est avant tout de promouvoir la compréhension du phénomène étudié par rapport à un objectif donné, toutefois dans la mesure où celui est soumis à une simplification de la réalité il y a donc une différence, acceptable ou non, entre le niveau de détail réel et celui décrit dans le modèle.
- Si trop peu de détails sont inclus, le modèle risque de ne pas fournir de comportements émergents satisfaisants pour la compréhension du système complexe.
- Si trop de détails sont inclus, le modèle peut devenir trop compliqué à formaliser, à implémenter et à analyser dans l'état actuel des connaissances.

- Nous définissons la calibration par la sélection d'un niveau de granularité approprié, mais aussi des limites macroscopiques et microscopiques. Il est donc parfois difficile de définir de façon absolue un niveau approprié de description structurelle et fonctionnelle.
- Le bon niveau pourrait être défini comme le niveau pertinent pour l'évaluation (i.e. en fonction des besoins de l'application), c'est à dire que le niveau de finesse approprié pour une fonction serait celui auquel on soit capable de définir un indicateur d'évaluation de son efficacité cohérent avec le niveau de préoccupation de l'évaluateur.

# Approches de modélisation

- En modélisation on distingue essentiellement les approches top-down (descendante) et bottom-up (ascendante) comme méthodes avec lesquelles l'organisation hiérarchique interne d'un système complexe est décrite.

# approches top-down (descendante)

- Selon Edmonds, une modélisation top-down est une approche dans laquelle on tente de définir l'organisation d'un système en formulant d'abord les principes généraux pour aller vers le détail.

# Approches bottom-up (ascendante)

- Inversement une modélisation bottom-up consiste à aborder la modélisation par les détails pour en produire les abstractions ou généralisations appropriées (typique d'une approche analytique).

- En fonction du domaine et de la connaissance de la structure et de la fonction d'un système (la vision est souvent parcellaire au niveau macroscopique), il peut parfois être difficile d'établir des principes généraux. Par exemple, s'il est possible de définir une fourmi, ses principaux comportements et ses interactions au sein d'une fourmilière, il n'en est pas de même de la fourmilière, l'approche bottom-up est alors la plus appropriée.

# Troisième étape: Dynamique.

- Elle consiste à utiliser les informations recueillies lors des deux étapes précédentes pour déterminer la dynamique du système.
- Landry et Santerre choisissent dans cette étape d'élaborer un diagramme causal qui repose sur la caractérisation des boucles de rétroaction du système.

# Quatrième étape: Conception.

- Cette étape porte sur le choix d'une méthodologie de modélisation.
- Les méthodologies fournissent des outils et proposent des procédures pour transformer, par exemple, le diagramme causal de la troisième étape en un modèle formel.
- Le choix d'une méthodologie influence grandement la façon de représenter le système réel.

# Critères de choix d'une méthodologie de modélisation

- Les critères de choix d'une méthodologie pour concevoir un modèle dépendent:
  - des caractéristiques du système complexe étudié
  - et de la perception qu'en a le modélisateur.
- Remarquons par ailleurs que dans un objectif de simulation informatique, l'architecture du système informatique peut influencer un choix méthodologique particulier, par exemple une approche orientée objet.

# Cinquième étape: Validation

- Cette dernière étape du processus de modélisation a pour but de confronter le modèle à la réalité par vérification et validation.
- La validation dans une approche systémique se réalise par comparaison du fonctionnement du modèle avec la réalité.
- Il n'existe pas de procédure unique et formelle de validation.
- La validation d'un modèle renvoie au processus suivant lequel on établit le degré de confiance qui est accordé au modèle lorsque il est utilisé dans certaines conditions et pour certains objectifs.

- Un modèle d'un système complexe ne présente un intérêt que s'il est expérimenté.
- Un modèle représente un système réel ou fictif tandis que la simulation imite le système en reproduisant pas à pas son comportement.
- La simulation est donc un processus de résolution pas à pas dans lequel il est possible de définir le pas temporel suivant mais qui ne précise pas comment aller directement vers n'importe quel instant futur.

# conclusion

- La capacité de manipuler la complexité, c'est-à-dire un grand nombre de variables liées de façon si inextricable que les causes et les effets soient indissociables, implique le recours aux modèles pour la simulation informatique abordant les problèmes d'un point de vue systémique.
- Ce processus de résolution se distingue des solutions analytiques qui décrivent l'état du système complexe à un instant futur quelconque plutôt que de façon séquentielle.

# Simulation de systèmes complexes

...À suivre