

Modèle

Le terme **modèle** synthétise les deux sens symétriques et opposés de la notion de ressemblance, d'imitation, de représentation. En effet, il est utilisé pour désigner :

- soit un concept ou objet considéré comme *représentatif d'un autre* (exemple : le « modèle réduit » ou maquette, le « modèle » du scientifique), déjà existant ou que l'on va s'efforcer de construire .
- soit un objet *réel* dont on va chercher à donner une représentation, que l'on va chercher à imiter (exemple : le « modèle » du peintre, le « modèle » que constitue le maître pour le disciple).

Le premier sens est le *sens original*. Le second sens dérive de la pratique des architectes et ingénieurs (puis des scientifiques) consistant à construire d'abord un prototype, concret ou conceptuel, qui servira de « modèle » à une construction réelle : le modèle est ainsi devenu, en outre, l'assemblage de concepts représentant de manière simplifiée une chose *réelle déjà existante* (objet, phénomène, etc.), en vue de la comprendre, d'en prédire le comportement, etc.

Sommaire

- 1 Modèle et réductionnisme
- 2 Sciences et techniques
- 3 Informatique
- 4 Mathématiques
- 5 Sciences humaines
- 6 Arts
- 7 Annexes
 - 7.1 Bibliographie
 - 7.2 Articles connexes

Modèle et réductionnisme

La démarche de modélisation correspond à la mise en oeuvre de la rationalité cartésienne et de la méthode scientifique. Il s'agit tout à la fois de se simplifier le travail, en éliminant les détails difficiles à reproduire, et d'obtenir un résultat plus net, en se concentrant sur les seuls traits jugés importants.

La modélisation est une discipline qui a ses règles, adaptées au domaine étudié. Ainsi, les proportions que doit respecter un modèle réduit pour qu'on puisse extrapoler son comportement à l'objet de taille réelle peuvent être différentes de ce qui paraît *a priori* naturel. Par exemple, la mécanique des fluides exige d'une maquette de bateau des proportions différentes du bateau pour conserver le nombre de Reynolds, tandis que l'extrapolation statistique ne permet pas une évolution dans les mêmes proportions entre une population étudiée et un échantillon représentatif.

Méthodes de Runge-Kutta pour le traitement numérique des équations différentielles ;

- Méthode des éléments finis ou Méthode des caractéristiques pour le traitement des équations aux dérivées partielles ;
- Simulation atomistique en physique des matériaux ;
- Méthode de Monte-Carlo en physique statistique, physique des matériaux, physique nucléaire, physique des particules, mathématiques, statistiques et économétrie ;
- Méthode ab initio en mécanique quantique, chimie quantique ;
- Système multi-agents, pour la simulation de systèmes complexes ;
- Discrétisation des équations (éléments finis, volumes finis, différences finies) en mécanique, aérodynamique, acoustique ;
- Dynamique moléculaire, dynamique d'amas en chimie, physique ;
- Simulations PIC (Particle-in-Cell) en physique.

Exemples de simulations

Expérience de Fermi-Pasta-Ulam en physique statistique.

- Le code MCNP développé au Laboratoire national de Los Alamos est très utilisé pour les simulations en physique nucléaire.
- Daisyworld de James Lovelock, en appui de sa théorie d'autorégulation nommée Gaïa.
- Projet de remorquage d'un iceberg à des fins d'approvisionnement en eau simulé par Dassault Systèmes sur les logiciels SIMULIA et Dymola ([en](#))

Exemples de logiciels de simulation numérique

ABAQUS : logiciel français de simulation (formulations implicite et explicite),

- Abinit : logiciel libre international pour la simulation de la structure électronique et atomique de matériaux.
- Acousys : logiciel de simulation acoustique (*CSTB*)
- ACTRAN, logiciel belge (société *Free Field Technologies*) de simulation acoustique.
- ADINA : système logiciel pour le calcul mécanique, thermique et fluide - possibilité de couplage des solveurs
- AMESim : logiciel de simulation 1D des systèmes multiphysiques
- ANSYS : logiciel américain de simulation par éléments finis des comportements en mécanique des structures, mécanique des fluides, électromagnétisme, etc.
- ANSYS CFX : logiciel de CFD pour le couplage fluide structure avec ANSYS
- AnyLogic : outil de simulation des processus et des systèmes dans différents domaines.
- CADFLOW : logiciels de simulation et Ingénierie pour la Plasturgie
- CalTox : logiciel libre de calcul de la toxicité d'une émission dans l'air
- Castor : logiciel français de simulation du comportement d'une structure mécanique.
- CFDesign : logiciel de simulation d'écoulement de gaz et de fluides
- Code Aster : logiciel libre de simulation numérique en mécanique des structures.

- Le modèle représente une réalité. Il ne constitue pas cette réalité, comme l'énonce l'adage « la carte n'est pas le territoire » ;
- Un modèle n'est pas (et n'a pas à être) parfaitement ressemblant : on vise une ressemblance suffisante, qui dépend de l'utilisation souhaitée (ainsi, un sculpteur et un médecin n'utilisent pas le même modèle d'un corps humain) ;
- La qualité d'un modèle dépend des techniques disponibles ;
- Le comportement du modèle correspond dans une certaine mesure, et dans une certaine plage de validité seulement, au comportement de la réalité : la ressemblance est, dans quelques cas, quantifiable.

La démarche est similaire à celle consistant à remplacer localement une courbe complexe par son cercle osculateur : licite, elle nécessite cependant du discernement.

Sciences et techniques

Article détaillé : Méthode scientifique.

En sciences et en génie, le mot « modèle » est utilisé dans quatre contextes différents :

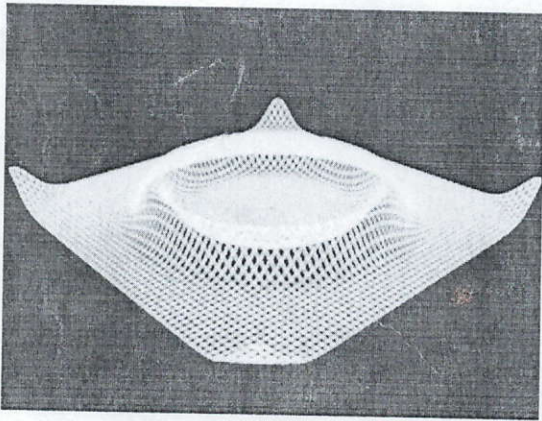
- La maquette ou le plan servant au prototypage ;
- Le modèle conceptuel, visant à la compréhension et au diagnostic ; une « vue de l'esprit » analytique ou algorithmique (avec ou sans mathématiques) représentant des phénomènes et leurs relations ;
- Les simulations, de nature prédictive ou diagnostique, souvent mises en œuvre par ordinateur. On distingue entre autres :
 - Les modèles statistiques ;
 - Les modèles numériques (ou modèles analytiques) ;
 - Les modèles stochastiques (ou aléatoires) et depuis quelque temps les calculateurs associés ;
 - Les simulations interactives (*i.e.* avec intervention humaine), ce qui englobe les jeux et les simulations d'entraînement ;
- Un organisme modèle est une espèce vivante que l'on peut facilement élever ou cultiver, afin de faire des expériences scientifiques qu'il serait plus difficile de mettre en œuvre avec des espèces plus complexes (l'espèce humaine par exemple

La **simulation** est un outil utilisé par le chercheur, l'ingénieur, le militaire etc. pour étudier les résultats d'une action sur un élément sans réaliser l'expérience sur l'élément réel.

Lorsque l'outil de simulation utilise un ordinateur on parle de simulation numérique. Il a également existé des simulateurs analogiques et il a été envisagé dans les années 1970 d'en construire des stochastiques.

Les chercheurs, les ingénieurs, les militaires et bien d'autres professionnels se posent souvent la question : quel est le résultat que j'obtiens si j'exerce telle action sur un élément ?

Le moyen le plus simple serait de tenter l'**expérience**, c'est-à-dire d'exercer l'action souhaitée sur l'élément en cause pour pouvoir observer ou mesurer le résultat. Dans de nombreux cas l'expérience est irréalisable, trop chère ou contraire à l'éthique. On a alors recours à la **simulation** : rechercher un élément qui réagit d'une manière semblable à celui que l'on veut étudier et qui permettra de déduire les résultats.



Ordinateur imitation d'une vague circulaire de mer.

Sommaire

- 1 Phénomène réel
- 2 La question
- 3 La réponse
- 4 Les solutions alternatives
- 5 Limites et avantages de la simulation
- 6 Différents types de simulation
- 7 Utilisation de la simulation
- 8 Notes et références
- 9 Voir aussi
 - 9.1 Articles connexes

Phénomène réel

Le phénomène réel à étudier peut appartenir à de nombreuses branches et en particulier :

- la physique (mécanique, optique, thermodynamique, électronique, etc.) :
 - exemple simple : mouvement d'une masse suspendue à un ressort et soumise à une impulsion.
 - exemple plus complexe : mouvement de la caisse d'une automobile en déplacement sur une route.
- l'économie :
 - exemple simple : remboursement d'un prêt avec intérêt.
 - exemple plus complexe : revenu d'une taxe dont on fait varier le taux.
- la biologie :
 - exemple simple : diffusion d'un médicament dans le sang en fonction du temps.
 - exemple plus complexe : évolution d'une épidémie dans une population en fonction du taux de vaccination et du temps.
- le raisonnement :
 - exemple simple : joueur artificiel de jeu d'échecs.
 - exemple plus complexe : aide à la décision dans un engagement militaire (jeu de guerre).
- etc.

La question

Au travers des exemples cités ci-dessus, certains professionnels peuvent s'interroger :

- l'ingénieur sur l'influence d'un changement d'amortisseurs sur le comportement d'un véhicule en déplacement sur une route.
- le ministre du Budget sur le rapport de la taxe à la valeur ajoutée sur un produit quand le taux en est modifié.
- le médecin sur l'influence d'un vaccin sur l'éradication d'une maladie dans une population.
- le militaire sur la tactique à employer dans un engagement de forces aériennes.

La réponse

Dans tous les cas ci-dessus la réponse pourrait être obtenue en tentant l'**expérience**.

- l'ingénieur peut construire de nouveaux amortisseurs, les intégrer sur le véhicule, le faire rouler en disposant dans l'habitacle des capteurs de mouvement (accéléromètres) qui lui feront connaître les forces subies par le conducteur et les passagers.
- le ministre peut décréter l'augmentation ou la baisse de la TVA sur un produit et relever, en fin d'année, les résultats sur les versements des commerçants.
- le médecin peut pratiquer la vaccination de la population et mesurer les effets au cours des années.
- le militaire peut engager des forces contre l'ennemi et mesurer les résultats.

Mais toutes ces expériences ont un ou plusieurs inconvénients :

- elles peuvent être coûteuses : la construction d'une nouvelle voiture est relativement chère.
- elles peuvent être longues : mesurer l'impact d'une vaccination au cours des années prend... des années.
- elles peuvent être contraires à l'éthique : on n'essaye pas un nouveau vaccin sur une population sans un minimum de garanties sur les résultats, on ne fait pas exploser une bombe sur une population uniquement pour en mesurer les effets, on n'effectue pas un essai d'accident sur un véhicule avec des passagers humains à bord.
- elles peuvent être "politiquement incorrectes" : on ne peut pas augmenter ou diminuer un impôt sans en prévoir les conséquences auparavant.
- elles peuvent être difficiles, voire impossibles à mettre en œuvre : le matériel n'existe pas ou la population de référence n'existe pas.
- les résultats ne peuvent pas être mesurés avec certitude : l'expérience ne peut pas être réalisée plusieurs fois dans des conditions identiques.
- etc.

Les solutions alternatives

L'expérience posant divers problèmes de réalisation, on a depuis longtemps fait appel à de très nombreux moyens et outils pour essayer de prévoir les résultats :

- les prototypes et les maquettes : on construit un exemplaire, éventuellement à échelle réduite, du matériel et on effectue sur lui les essais. La simulation est très proche de l'expérience et on a donc une partie des inconvénients (coûts, durée).
- on remplace l'humain par un animal : il faut trouver des populations animales dont les comportements sont proches de l'homme vis-à-vis d'un phénomène donné. De nombreux groupes de pression luttent contre cette pratique.
- on représente le phénomène par une équation : les exemples abondent et ont été utilisés par tous les élèves et étudiants dans les cours de physique, de chimie, etc. Seuls les phénomènes les plus simples sont susceptibles de ce type de simulation.
- les manœuvres : les militaires font s'affronter deux troupes opposées (les oranges contre les bleus) sur un vrai terrain avec de vrais matériels mais sans utiliser de munitions réelles. Des arbitres décident des dégâts infligés.

Tous ces outils sont des simulations. Elles sont plus ou moins proches de l'expérience et plus ou moins faciles à mettre en œuvre.

Depuis quelques années un nouvel outil a fait son apparition : l'ordinateur et la simulation numérique. Le principe de base est celui de la représentation du phénomène par une équation.

L'ordinateur permet toutefois de s'affranchir de la limitation principale : la représentation des phénomènes les plus simples. Grâce à une puissance de calcul toujours croissante et à l'augmentation du volume de données stockables il est possible de découper un phénomène complexe en milliers, voire en millions, de phénomènes simples et donc de calculer les résultats sur le phénomène complexe.

Exemple : on sait, en aérodynamique, représenter par une équation les forces (portance, traînée) qui résultent de l'action d'un courant d'air sur une plaque plane. On ne sait pas représenter par une équation ces mêmes forces lorsque l'action est exercée sur une surface complexe telle que l'aile d'un avion. La simulation numérique permet de découper l'aile en plusieurs millions de petits éléments qu'on considère comme étant des plaques planes. On peut alors calculer les forces qui s'exercent sur chacune d'entre elle et les combiner pour calculer les forces sur l'aile complète.

Limites et avantages de la simulation

L'ordinateur permet aujourd'hui de simuler des phénomènes très complexes tel qu'un avion complet mais la puissance reste encore insuffisante pour représenter l'ensemble des phénomènes météorologiques : la simulation de l'évolution du temps reste encore très difficile au delà de quelques heures.

La simulation permet d'effectuer des recherches sur un système isolé, en faisant varier les paramètres un à un et en recommençant avec les mêmes conditions initiales.

L'expérimentation, sauf pour les phénomènes simples, ne permet pas toujours d'isoler le système à étudier de son environnement; la maîtrise des conditions initiales peut être compliquée et l'expérience peut détruire le système étudié ou le modifier suffisamment pour empêcher de recommencer.

La simulation est souvent moins chère que l'expérimentation et comporte beaucoup moins de risques lorsque l'homme fait partie du système étudié. Les résultats peuvent être obtenus beaucoup plus rapidement.

La simulation (surtout numérique) est basée sur une connaissance des phénomènes qui ne peut être obtenue que par l'expérimentation. Une simulation ne peut donc être réalisée que si on dispose d'un acquis de connaissances suffisant obtenu par des expérimentations sur des phénomènes antérieurs et analogues. Quelle que soit la qualité de la simulation, elle ne remplace pas totalement l'expérimentation.

Certaines simulations ont un coût très élevé (même s'il reste faible devant celui de l'expérimentation). Ceci explique que les utilisateurs de la simulation, en particulier lorsqu'elle utilise des moyens de calcul exceptionnels, sont les industries à forte valeur ajoutée (aéronautique et espace, nucléaire) ou à risque élevé (militaire).

Différents types de simulation

On appelle *modèle* un élément, analogique ou numérique, dont le comportement vis-à-vis d'un phénomène est similaire à celui de l'élément à étudier. Les *sorties* sont les éléments que l'on veut étudier. Les *entrées*, *paramètres* et *contraintes* sont les éléments dont la variation influe

sur le comportement du modèle ; on appelle entrée ceux qui sont commandés par l'expérimentateur, paramètres ceux que l'opérateur choisit de fixer et contraintes ceux qui dépendent d'éléments extérieurs. On appelle *simulation* l'ensemble constitué par un modèle, les ordres d'entrée, les paramètres et contraintes, et les résultats obtenus.

Comme indiqué plus haut les maquettes, prototypes, etc. peuvent être considérés comme des modèles analogiques et les essais, tests, manœuvres, etc. comme des simulations analogiques.

Les équations sont des simulations numériques. Aujourd'hui ce terme s'applique essentiellement aux modèles et simulations réalisés sur ordinateur.

Dans certains cas on peut réaliser des simulations hybrides, analogiques - numériques, qui intègrent divers éléments dont certains seulement sont représentés par des équations.

Lorsque le calculateur est suffisamment rapide pour fournir un résultat à la même vitesse, voire plus rapidement, que le phénomène réel on parle de **simulation en temps réel**. On peut alors réaliser des simulations analogiques - numériques où l'un des éléments analogiques est l'homme : il s'agit de **simulation avec l'homme dans la boucle**. Un simulateur de pilotage en est un bon exemple : le pilote (analogique) est assis dans une cabine de pilotage quasi-réelle (analogique) et pilote son avion. Les ordres qu'il donne sont lus par un ordinateur qui calcule les mouvements de l'avion (numérique). Ces mouvements sont restitués (analogique) sur la cabine et sur les écrans ce qui permet au pilote de sentir et voir les effets des ordres qu'il a donné.

Le jeu de simulation est une application récente du même principe. La différence entre le jeu et le simulateur d'étude réside soit dans :

- le coût des éléments analogiques : un simulateur de pilotage pour jouer remplace la cabine réelle par un clavier d'ordinateur et n'utilise qu'un seul écran pour montrer les instruments et le paysage. Par contre, au moins dans le cas d'un avion de tourisme, les équations de vol sont les mêmes que celles du simulateur d'étude qui est utilisé par l'ingénieur.
- dans l'introduction de paramètres fantastiques : le simulateur pour jouer introduit des phénomènes qui n'existent pas dans la réalité telles que pouvoirs surnaturels, armes nouvelles, etc.

Utilisation de la simulation

Les simulations sont utilisées par les professionnels (chercheurs, ingénieurs, économistes, médecins, etc.) dans toutes les phases de recherche ou d'étude d'un phénomène ou pour concevoir et améliorer les systèmes.

Les simulateurs hybrides analogiques - numériques avec homme dans la boucle, sont de plus en plus utilisés pour l'enseignement ou l'entraînement. Leur coût relativement élevé les a d'abord réservés aux professions les plus en pointe ou à risque (pilotage d'un aéronef, commande d'une centrale nucléaire, engagement armé, etc.). La diminution du prix des systèmes vidéo permet d'envisager aujourd'hui des applications à la conduite des camions voire des automobiles.

(9)

Enfin de nombreux jeux vidéo sont des utilisateurs des mêmes techniques soit en permettant au joueur de se trouver dans une situation excitante ou dangereuse (pilote de chasse...) soit dans une situation fantasmagorique.