

## Préface

Les systèmes que l'homme architecture et fabrique sont au cœur du monde moderne : il suffit de fait de penser aux systèmes sociaux et politiques, aux systèmes économiques et industriels, aux systèmes monétaires et financiers, aux systèmes de production et distribution d'énergie, aux systèmes de transport, aux systèmes de communication et plus généralement aux très nombreux systèmes organisationnels et technologiques qui nous entourent, pour se rendre compte que les systèmes « ingénierés »<sup>1</sup> sont simplement partout...

Tous ces systèmes sont de plus en plus caractérisés à la fois par une très grande complexité intrinsèque et par des interdépendances toujours croissantes. La maîtrise de ces systèmes est donc devenue un vrai enjeu, dans un monde en profonde transformation où ils doivent pouvoir résister à la pression constante et souvent contradictoire des citoyens et des consommateurs, des marchés et de la réglementation, de la concurrence et de l'innovation technologique, pour ne citer que quelques exemples de forces auxquelles ils sont soumis<sup>2</sup> dans quasiment tous les domaines de l'industrie et des services où l'on trouve des systèmes complexes (aéronautique, automobile, digital, énergie, génie civil, high tech, naval, ferroviaire, mines, spatial, systèmes d'information, etc.).

Maîtriser la complexité d'un système, c'est fondamentalement être capable de maîtriser son processus d'intégration, autrement dit de sa construction par interconnexion

---

1. Les systèmes vivants sont une autre histoire et nous limiterons notre périmètre de réflexion aux seuls systèmes ingénierés, autrement dit aux systèmes artificiels (par opposition aux systèmes naturels) architecturés par l'homme, ce qui couvre déjà un vaste spectre dans la mesure où tant les systèmes techniques que les systèmes organisationnels sont susceptibles d'entrer dans ce cadre conceptuel.

2. Sans oublier les limites intrinsèques des ressources physiques et environnementales de notre planète dont il est désormais impossible de ne plus tenir compte.

et/ou mise en réseau de systèmes de plus petite taille. Ce processus reste sans doute encore largement incompris dans la mesure où il génère le phénomène mystérieux qu'est l'émergence : un système intégré aura en effet toujours des propriétés nouvelles – dites « émergentes » – qui ne peuvent pas facilement s'obtenir ou s'exprimer avec ses briques de base.

Pour bien comprendre ce dernier concept, considérons par exemple un mur formé uniquement de briques (sans mortier pour les lier) dans un souci de simplicité. Un modèle systémique simple d'une brique peut alors être caractérisé par :

- un comportement fonctionnel consistant d'une part à fournir des forces de réaction lorsque des forces mécaniques agissent sur la brique et d'autre part à absorber les rayons lumineux ;

- un comportement interne fourni par trois états invariants : « longueur, largeur, hauteur ».

En composant de tels modèles de briques, un mur sera simplement un réseau de briques reliées par des forces d'action/réaction mécaniques. Mais un tel mur ne pourra mécaniquement avoir qu'un comportement fonctionnel consistant à absorber les rayons de lumière. Ce n'est cependant clairement pas le comportement habituel d'un mur, puisqu'il faut tenir compte des trous existant dans les murs (pour les fenêtres) qui doivent laisser passer la lumière ! On notera aussi qu'il est difficile – et probablement vain – d'essayer d'exprimer la forme d'un mur (qui est l'un de ses états internes typiques) en fonction de la longueur, de la largeur et de la hauteur des briques qui le composent. Tous ces faits obligent donc à créer un modèle systémique dédié, plus abstrait, pour modéliser spécifiquement un mur, dès lors que l'on veut traduire ses propriétés réelles. En termes systémiques, cela se traduit en observant que des propriétés du mur comme « laisser passer la lumière » ou des caractéristiques du mur comme sa « forme » sont des propriétés et des caractéristiques émergentes au niveau du mur, ceci voulant dire qu'on ne peut les observer qu'au niveau du système « mur » et pas au niveau de ses sous-systèmes « briques » et qu'elles émergent donc du processus d'intégration des sous-systèmes « briques » qui aboutit au système « mur ». Ce mécanisme d'émergence est en fait une caractéristique universelle des systèmes : tout système a toujours des propriétés émergentes dans le sens que nous venons de rappeler.

Ces considérations peuvent sembler être du bon sens, voire naïves, mais malheureusement, on ne peut que constater en pratique que leurs conséquences ne sont généralement pas comprises, ce qui entraîne de nombreux problèmes de qualité et de manque de maîtrise que l'on observe sur de nombreux systèmes complexes modernes. La plupart des ingénieurs et des décideurs continuent en effet de penser que la maîtrise

des composants d'un système intégré est suffisante pour maîtriser le système dans son ensemble. Cependant, la nature même du mécanisme d'intégration impose de ne pas avoir que des responsables en charge des composants lorsque l'on doit concevoir un système intégré : il est également essentiel de confier à un responsable spécifique le modèle intégratif de haut niveau du système considéré. C'est là le rôle-clé de l'architecte de systèmes, qui n'existe malheureusement souvent pas dans la plupart des organisations industrielles, aussi étrange que cela puisse paraître pour quiconque a conscience des fondamentaux systémiques sous-jacents !

Penser l'intégration d'un système complexe hétérogène, résultant de l'interaction de plusieurs systèmes homogènes, nécessite de fait de raisonner transversalement en construisant des modèles d'un type nouveau qui capturent l'émergence en intégrant de manière cohérente les parties de chaque modèle homogène constitutif d'un modèle systémique d'ensemble. Or force est de constater que rien ne nous prépare à ce nouveau paradigme qu'est le raisonnement systémique, qui oblige à mettre en relation des savoirs de nature extrêmement différentes et à transcender les silos traditionnels d'organisation de la connaissance, alors même que l'on sait pourtant depuis longtemps<sup>3</sup> que l'on ne peut pas optimiser un système dans son ensemble en optimisant chacun de ses sous-systèmes.

L'émergence d'une vraie science des systèmes – la systémique – capable d'aborder de façon rigoureuse les nombreux problèmes que posent la conception et la gestion de l'évolution des systèmes complexes modernes est donc d'une urgente nécessité si l'on veut pouvoir apporter des réponses satisfaisantes aux nombreux défis de nature profondément systémiques que l'humanité va devoir relever à l'aube du troisième millénaire. Cette émergence n'est bien entendu pas facile car on peut aisément comprendre que le développement de la systémique se heurte mécaniquement à l'ensemble des disciplines classiques qui peuvent toutes prétendre à apporter une partie des explications nécessaires à la compréhension d'un système et qui ne voient donc naturellement pas d'un bon œil une nouvelle discipline prétendre les englober dans une approche holistique...

L'ouvrage de Jacques Printz est donc une contribution extrêmement importante à cette nouvelle discipline scientifique et technique naissante : c'est en effet d'abord l'un des très rares ouvrages « sérieux » publié en français et offrant une bonne introduction à la systémique. Il donne en effet une vision extrêmement large de ce domaine, en prenant un fil conducteur donné par l'architecture des systèmes, autrement dit par la partie de la systémique qui s'intéresse à la structure des systèmes et à leurs

---

3. Ce résultat est dû à Richard E. Bellmann dans un article de contrôle optimal datant de 1952 où il montre que seuls les systèmes que l'on peut optimiser par parties sont les systèmes linéaires... classe à laquelle n'appartient aucun système complexe en pratique.

processus de conception, qui permet à tout un chacun de bien appréhender les enjeux et les problématiques de la systémique. Nous ne pouvons donc qu'encourager le lecteur à tirer toute la quintessence de l'ouvrage magistral de Jacques Printz qui mélange rappels historiques expliquant comment la systémique a émergé, introduction aux concepts clés de la systémique et exemples pratiques permettant de bien comprendre la nature et la portée des idées introduites.

On ne saurait cependant couvrir facilement l'ensemble du périmètre de la systémique tant ce dernier est large. De nombreux autres sujets pourraient de fait faire l'objet d'autres ouvrages : dynamiques des systèmes, dimensionnement et optimisation des systèmes, trajectoires d'évolution de systèmes, conception de familles homogènes de systèmes, approches agiles et collaboratives pour le développement de systèmes, gouvernance des systèmes, etc. Le lecteur désireux d'en savoir plus pourra par exemple utilement tirer profit du cycle de conférences internationales « Complex Systems Design & Management » que l'association CESAMES organise chaque année à Paris et tous les deux ans en Asie<sup>4</sup> et qui permettent de prendre régulièrement le pouls de la vitalité de l'approche systémique appliquée à l'ingénierie de systèmes complexes. Les nombreuses conférences organisées par l'association internationale d'ingénierie système, l'INCOSE (International Council on Systems Engineering), sont aussi d'excellents endroits pour approfondir ce domaine et rencontrer la communauté internationale qui s'intéresse à ces problématiques.

L'univers des systèmes est de fait un « continent »<sup>5</sup> qui forme un réel champ scientifique et technique pour une vraie science des systèmes. La systémique reste cependant encore à construire, nécessairement dans une interaction profonde entre théorie et pratique, malgré les prises de conscience pourtant déjà anciennes – et malheureusement quasiment sans suites – de grands précurseurs comme H. Simon ou K.L. von Bertalanffy. Espérons donc que les défis systémiques que le monde moderne commence à affronter vont enfin lui permettre d'émerger.

Daniel KROB  
Président du Centre d'excellence sur l'architecture,  
le management et l'économie des systèmes (CESAMES)  
Professeur de l'École polytechnique  
*INCOSE Fellow*

---

4. La conférence « Complex Systems Design & Management Asia » a été organisée de 2014 à 2018 à Singapour. L'édition 2020 de cette conférence est organisée à Pékin avec le soutien du chapitre chinois de l'INCOSE et de la Fédération chinoise d'aéronautique.

5. Pour reprendre une expression que Marcel Paul Schützenberger n'aurait sans doute pas reniée...

## Avant-propos

Cet ouvrage a une longue histoire !

Dans nos expériences respectives, nous étions convaincus de la nécessité de donner une large place à cet enseignement d'un genre nouveau qui a accompagné le développement de l'informatique, et des systèmes informatisés, depuis leur naissance. Le bornage de cette évolution, les *milestones* comme disent nos collègues anglo-saxons, peut être résumé en quelques titres : *Industrial dynamics* et *Principles of systems* de J. Forrester, *Sciences of the artificial* de H. Simon, et la série de G. Weinberg, *Quality Software Management*, volume 1 : *Systems Thinking* (ou encore son *Introduction to General Systems Thinking*), accompagnée de trois autres tomes. Peut-être également les trois volumes de J. Martin, *Information engineering...*

Dans les années 1990 se produit un événement majeur dont on n'a peut-être pas encore mesuré le bouleversement qu'il introduit dans notre système de pensée : l'informatique cesse définitivement d'être comprise comme un système centralisé autour d'un « gros » *mainframe* chef d'orchestre, pour devenir un système distribué, un assemblage de « clients » et de « serveurs » qui se rendent des services mutuels qu'il faut cependant intégrer. Il n'y a plus de « centre » au sens vulgaire du terme, ou plutôt, le centre est partout, tout interagit. Les machines qui bientôt tiendront dans la main percolent et infusent dans toute la société, dans tous les domaines. Le challenge tient en deux mots : parallélisme *et* intégration, nonobstant une qualité de service en rapport avec la diffusion de la technologie et le risque associé à l'usage.

C'est dans ce contexte que, sous l'impulsion de C. Rochet, alors en charge d'un programme de formation à ces nouveaux systèmes à l'IGPDE<sup>1</sup>, que naît l'idée de

---

1. Institut de la gestion publique et du développement économique ; opérateur de formation permanente du ministère de l'Économie et des Finances et du ministère de l'Action et des Comptes publics.

proposer un cycle de formation complet faisant une large place à ce *Systems thinking*, en association avec l'École polytechnique, *via* la chaire d'Ingénierie des systèmes complexes dirigée par D. Krob, où le Cnam aura également sa place. Un processus de même nature se développera au ministère de la Défense *via* la DGA.

De cette intense activité naîtra une formation originale, baptisée « formation » car elle associe de façon indissociable un apport conceptuel indispensable et une mise en œuvre immédiate des nouveaux concepts acquis, le tout débouchant sur des formations à l'architecture de systèmes dispensées aujourd'hui par CESAMES Academy, formations labellisées RNCP<sup>2</sup>.

L'ouvrage proposé est le résultat de cette histoire et des innombrables discussions, rapports, présentations, conférences, essais/erreurs, etc. qui l'ont accompagné. Le constat étant que dans la littérature accessible en français, soit les ouvrages disponibles étaient obsolètes – datant d'avant la révolution de la distribution –, soit incomplets et/ou inadaptés car trop qualitatifs et non intégrés dans un cadre projet permettant l'action coordonnée de toutes les parties prenantes et des équipes d'ingénierie, elles-mêmes distribuées.

Pour réaliser les systèmes répondant aux besoins présents et futurs des usagers, il faut d'abord « penser » la complexité dans un cadre qui est précisément celui proposé dans cet ouvrage, d'où son titre et son sous-titre.

---

2. Répertoire national des certifications professionnelles ; voir <http://www.rncp.cncp.gouv.fr/>.