

## Chapitre 5 : l'Ingénierie Systémique

### I- Le développement de la systémique

Le concept "moderne" de système s'est peu à peu construit aux États-Unis depuis les années 1940. Il provient de différents domaines mais il faut signaler les contributions spéciales provenant de la biologie, des mathématiques, de la physique, de l'ingénierie et de la gestion. Il faut de ces différents domaines retenir les apports significatifs de V. Bertalanffy, N. Wiener, C.E. Shannon, W. Weaver, et J.W. Forrester.

Von Bertalanffy [**BER 71**], biologiste, présente, dès 1937, le concept de "système ouvert" qui évoluera petit à petit vers la "théorie générale des systèmes" (General System Theory). Le but de cette théorie générale était de dégager des principes explicatifs de l'univers considéré comme système à l'aide desquels on pourrait modéliser la réalité. Bertalanffy proclamait alors: "...il y a des systèmes partout". Ceci revient à dire que l'on peut observer et reconnaître partout des objets possédant les caractéristiques des systèmes. C'est-à-dire des totalités dont les éléments, en interaction dynamique, constituent des ensembles ne pouvant être réduits à la somme de leurs parties.

En collaboration avec l'économiste Boulding, le physiologiste Gerard et le mathématicien Rapoport, Bertalanffy fonde, en 1954, la "Société pour l'Étude des Systèmes Généraux" créa un cahier annuel, le "General Systems Yearbook", et favorisa la publication d'un nombre impressionnant d'articles traitant de la systémique.

Professeur de mathématiques au Massachusetts Institute of Technology depuis 1919, Wiener collabore avec Rosenblueth du "Harvard Medical School" et s'adjoint en 1940 l'ingénieur J. H. Bigelow. Après avoir travaillé au développement d'appareils de pointage automatique pour canons anti-aériens, ils en arrivent à la conclusion que: "pour contrôler une action finalisée (orientée vers un but), la circulation de l'information nécessaire à ce contrôle doit former 'une boucle fermée permettant d'évaluer les effets de ses actions et de s'adapter à une conduite future grâce aux performances passées'" [**Rosnay, 1975**].

Peu à peu, les recherches foisonnent sur le sujet. Des équipes interdisciplinaires se forment et tentent de généraliser ces principes à différents secteurs tels la sociologie, les sciences politiques ou la psychiatrie. Les travaux se multiplient et "la nécessité de faire exécuter par des machines certaines fonctions propres aux organismes vivants, contribue, en retour, à accélérer les progrès des connaissances sur les mécanismes cérébraux" [**Rosnay, 1975**].

Quelques années plus tôt, Claude Shannon, ingénieur des télécommunications chez Bell, et W. Weaver publient en 1949 un ouvrage important sur "la théorie mathématique de la communication" et élaborent une théorie de l'information. À l'exception des systèmes relatifs à l'humain, avant les années 1950, la science représentait des entités traitant de la matière ou de l'énergie, mais pas de l'information. Depuis Shannon, on reconnaît que l'information peut être traitée par une machine, une plante ou un animal. Ces deux auteurs ont dégagé le concept d'information, vidé de toute référence à son contenu subjectif, et ont considéré uniquement l'énergie qui circule dans une voie de communication.

Petit à petit, la cybernétique, la théorie des systèmes et de l'information s'étendent à l'entreprise, à la société et à l'écologie. J. W. Forrester, ingénieur électronicien et professeur à la "Sloan School of Management" du MIT, crée en 1961 la dynamique industrielle. Dans ce cadre, il considère l'entreprise en tant que systèmes cybernétiques et tente, par la simulation, de prévoir son comportement. Il dégage une technique de modélisation et met au point le langage Dynamo facilitant la modélisation systémique. Plus tard, il étend cette approche aux systèmes urbains et en 1971, il crée une nouvelle discipline, la "dynamique des systèmes".

## A- Définitions

### 1- Définition d'un système

Le mot système dérive du grec "systema" qui signifie "ensemble organisé". Selon Bertalanffy (1973), un système est "un complexe d'éléments en interaction" [BER 71].

Pour de [Rosnay, 1975], "un système est un ensemble d'éléments en interaction dynamique, organisés en fonction d'un but" (p.93).

Le [Moigne 1977] le considère comme "un objet qui, dans un environnement, doté de finalités, exerce une activité et voit sa structure interne évoluer au fil du temps, sans qu'il perde pourtant son identité unique. ...

Ou encore:

- un objet actif dans un environnement
- un objet structuré par rapport à quelques
- un objet évoluant finalités"

Mélèze (1972) nous propose la définition suivante: "Des finalités et des buts étant exprimés sur un environnement, un système finalisé est un ensemble organisé de moyens, méthodes, règles et procédures qui permet d'obtenir des réponses satisfaisantes de l'environnement" (p.53).

Checkland conçoit la notion de système comme étant "un modèle d'une entité totale; lorsqu'appliqué à l'activité humaine, il se caractérise en termes de structure hiérarchique, de propriétés émergentes et de réseaux de communication et de contrôle. Lorsque appliquées à des ensembles naturels ou des ensembles conçus par l'homme, les propriétés émergentes qui s'en dégagent en constituent la caractéristique première" [Checkland, 1981] pp. 317-318.

De plus, il ajoute que "... un ensemble complexe peut posséder des propriétés qui se retrouvent au niveau de l'ensemble, mais qui ne sont pas significatives ou pas représentatives des parties qui le composent. Ce sont des propriétés émergentes" [Checkland, 1990], pp. 18-19).

Selon [MOR 77], « on peut concevoir le système comme une unité globale organisée d'interrelations entre éléments, actions ou individus », l'organisation étant alors «l'agencement de relations entre composants ou individus qui produit une unité complexe ou système, dotée de qualités inconnues au niveau des composants ou des individus ». La modélisation d'un système est requise lorsque l'on a l'intention de le comprendre ou d'agir sur lui, que ce soit pour le concevoir, le structurer, le piloter ou l'améliorer.

### 2- Définition d'un acteur

Le terme d'« acteur » désigne une ressource de nature humaine de l'entreprise, qui peut être individuelle ou collective. Un acteur individuel (collectif) est une personne (une organisation de travail) ayant reçu la responsabilité de réaliser une mission (prescription d'un décideur) et agissant de manière permanente, temporaire ou occasionnelle, au service de l'entreprise considérée. Il existe des acteurs collectifs de différents niveaux, depuis le «binôme» jusqu'à l'entreprise considérée dans sa globalité, en passant par toutes sortes d'intermédiaires : groupes de travail, équipes projet, métiers, filières métiers, Direction de projet, usines, etc. Un acteur collectif peut être décomposé en acteurs de plus petits cardinaux, collectifs ou individuels.

Un acteur peut lui-même participer à des missions de différents acteurs collectifs de plus grands cardinaux. Il est alors important de constater que la différence porte sur l'horizon de ces missions: court, moyen, ou long terme. L'organisation matricielle, traditionnellement utilisée depuis le début des années 90 [MID 98], n'est qu'une façon de séparer

ces différents types d'horizon : les acteurs ont en charge des missions à court et moyen terme (par exemple, élaborer l'architecture du produit, rédiger les justifications des choix...), mais aussi des missions à long terme (par exemple, de développement des métiers et d'innovation...). Cependant, un acteur-projet peut avoir une certaine stabilité, surtout avec le concept de plateforme qui fédère un faisceau de projets et qui s'inscrit dans la durée (plus de 5 ans). La Direction de projet est aussi à considérer comme un acteur-métier, qui développe des compétences spécifiques.

## **B- La dynamique des systèmes**

L'approche systémique insiste sur les transformations qui se produisent à l'intérieur des ensembles que l'on étudie. Ces transformations ou changements résultent de modifications plus ou moins contrôlées que subissent les intrants provenant d'autres systèmes ou de l'environnement. Ces transformations produisent des extrants qu'absorbent d'autres systèmes ou l'environnement.

Ce processus de changement ou de transformation des intrants en extrants est à la base de la dynamique des systèmes et a été expliqué par la cybernétique.

## **C- L'approche systémique**

Comme le souligne de [Rosnay 1975], il semble que notre éducation ne nous ait pas incités à avoir une vision globale de l'univers et des ensembles qui nous entourent. La réalité, telle que présentée tout au long de nos études, a toujours été découpée en disciplines ou portions de réalité fragmentées et isolées. A cause de cette formation, il nous est difficile de la considérer dans sa totalité, sa complexité et sa dynamique. Pour sa part, le concept de système s'efforce de relier les ensembles au lieu de les isoler, considère les interactions plutôt que les éléments.

Ce concept de système nous aide à observer la réalité en la considérant comme étant formée d'ensembles dynamiques interreliés. De plus, il favorise l'application d'une approche qui nous incite à réfléchir sur les buts pour lesquels les systèmes sont mis en place, à découvrir les relations existant entre les fins, les fonctions et les structures. Connaissant les buts d'un système, nous sommes en mesure d'en évaluer régulièrement les extrants et d'exercer des contrôles sur ses différents aspects.

Cette approche exige également que nous concentrons notre attention sur la réalisation des objectifs qui justifient l'existence d'un système et sur les critères nous permettant d'en vérifier la performance.

L'approche systémique, c'est donc l'application du concept de système à la définition et à la résolution des problèmes. Cette approche nous fournit une stratégie de prise de décisions dont les aspects les plus évidents sont:

- une insistance sur l'identification et la définition, des finalités, des buts et des objectifs du système et une énumération de critères et d'indices suffisamment précis et nombreux
- un examen minutieux des différents aspects qui caractérisent les intrants;
- une identification des meilleures alternatives possibles concernant les fonctions et les structures favorisant l'atteinte des objectifs d'un système;
- l'identification, l'intégration et la mise en oeuvre de mécanismes auto-correctifs (rétroaction/régulation) ajustant les objectifs du système à ceux de l'environnement, et à ceux des autres systèmes avec lesquels il interagit, les extrants aux objectifs du système et les variables d'action en fonction de la qualité et de la validité des extrants;
- l'analyse du système global en sous-systèmes, en repérant les intrants, les variables de transformation, les extrants de chaque unité et leurs points d'interface avec d'autres systèmes et avec l'environnement;
- l'implantation progressive du système et l'évaluation des extrants par rapport aux critères de performance identifiés au préalable.

Compte tenu du concept de système et de ses propriétés, il y a, dans l'approche systémique, plusieurs règles, plusieurs sous-entendus qui doivent être appliqués et respectés mais qui ne peuvent être inclus dans l'énumération et la description de ses étapes.

Mentionnons celle clairement exposée par [Mélèze 1972]. "L'approche systémique est un processus qui tend à faire évoluer l'organisme auquel il s'applique en débloquent des latitudes d'initiatives et de changement: on élabore en premier lieu un "baby-system" finalisé, fortement ouvert sur l'environnement et doté des capacités d'adaptation et d'apprentissage. La structuration de chaque partie du système, la définition de ses liaisons, de ses méthodes et de ses procédures vont se développer progressivement par essais-erreurs au contact de l'environnement, par ajustements successifs et par accroissement de la variété de contrôle" (p.79-80).

## II- L'Ingénierie Système (IS)

C'est une démarche méthodologique développée pour maîtriser la conception et l'intégration des systèmes complexes (produits, systèmes de production...).

Différentes normes relatives à l'Ingénierie Système coexistent [EIA 98], [IEE 99], [ISO 03]. Elles décrivent des principes d'organisation des projets et les pratiques (jugées bonnes) des métiers associés en termes de processus et d'activités. Elles ont des champs d'application limités mais se complètent. La démarche d'IS permet d'intégrer les contributions de toutes les disciplines impliquées dans les phases de conception et d'intégration d'un système, en tenant compte des différentes exigences des parties prenantes (besoins, contraintes) intervenant au cours des différentes phases du cycle de vie d'un système (point de vue utilisateur). Grâce à la mise en oeuvre systématique et coordonnée d'un ensemble de processus génériques par des équipes multidisciplinaires, l'IS permet la conception équilibrée d'une solution satisfaisant ces exigences, ainsi que des objectifs du projet en termes de coûts, délais, risques ... (point de vue du concepteur).

Dans le cadre du développement d'un produit et de son système de production associé, les buts de cette démarche sont de décomposer un système complexe sur différentes couches, d'identifier et d'organiser les activités techniques, d'éviter les retours arrière tout en progressant avec assurance (gestion des risques et de la maturité de la conception sur chaque couche), de maîtriser les informations nécessaires à la réalisation et ainsi de réduire les délais et coûts de développement.

### A- Définition

On peut définir l'ingénierie systémique (IS) comme une approche interdisciplinaire permettant de développer des systèmes correspondant aux buts fixés. On entend ici par système un ensemble d'éléments organisés en vue d'atteindre des objectifs donnés. Au delà de cette définition générale, l'IS permet d'identifier un concept valable du système proposé, d'en définir et d'en valider des exigences de conception claires, de concevoir un système correspondant qui soit efficace, et d'assurer que ce système répond aux attentes des clients et des utilisateurs dans son contexte opérationnel.

L'IS est apparue d'abord dans le domaine des communications vers les années 50 aux États-Unis; elle s'est ensuite répandue dans les domaines de l'aérospatiale, de la défense, de l'électronique, de l'énergie et du biomédical. En raison de son succès pour la conception de systèmes dans ces domaines, elle apparaît de plus en plus comme une voie d'avenir pour faire face aux défis toujours plus grands posés par la conception d'ensembles toujours plus complexes, soumis à des contraintes de toutes sortes (environnementales, économiques, sûreté, etc.). Elle est aussi particulièrement adaptée au développement de nouveaux produits commerciaux, en particulier à cause de sa rigueur et de sa capacité à intégrer diverses méthodes et techniques.

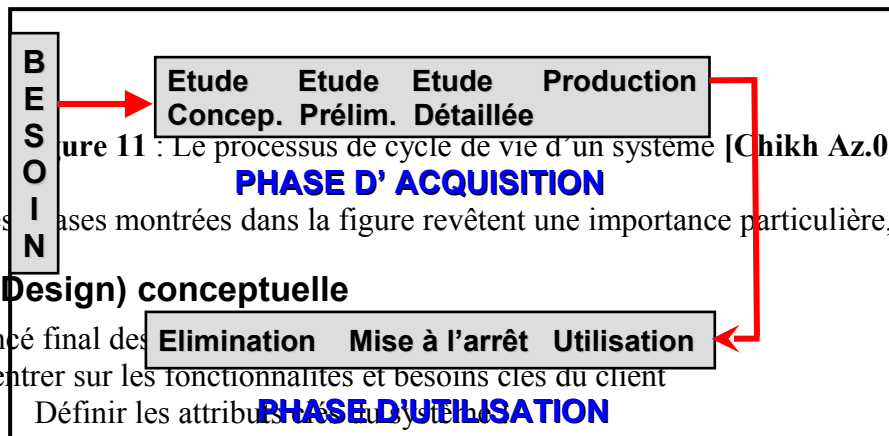
## B- Description de l'Ingénierie Systémique

L'IS permet d'encadrer toutes les étapes du cycle de vie d'un système, à partir de l'identification des besoins et des exigences jusqu'à son remplacement éventuel en passant par les activités de formation, d'entretien, de déploiement, etc. Elle comprend les grandes catégories d'activités suivantes [Martin, 1997]:

- La gestion qui planifie, organise, contrôle et dirige le développement technique d'un système.
- L'identification des exigences et la définition de l'architecture et des composantes (matérielles, logicielles, aspects organisationnels) du système.
- L'intégration et la vérification des composantes du système pour s'assurer que les exigences pertinentes sont satisfaites.

L'application des principes d'ingénierie systémique, qui est facilitée par une vue du système à développer sous forme de blocs élémentaires (IEEE1220, 1995). Un bloc élémentaire contient, à un niveau de décomposition donnée, ses éléments constituants et les services qu'il requiert (soutien, distribution, formation, fabrication, etc.). Un système de taille arbitraire peut ainsi être représenté sous forme d'un ensemble de blocs, facilitant ainsi la planification des activités de conception, développement et déploiement.

En plus d'encadrer les diverses étapes de la conception d'un système à l'intérieur d'un processus, l'IS joue un rôle d'intégrateur des spécialités individuelles (p. ex., électrique, mécanique, pneumatique). La figure suivante illustre les phases typiques de développement d'un système et identifie des méthodes, techniques ou disciplines particulières susceptibles d'être utilisées.



Certaines des phases montrées dans la figure revêtent une importance particulière, dont:

### 1- Etude (Design) conceptuelle

- Enoncé final des fonctionnalités et besoins clés du client
- Se concentrer sur les fonctionnalités et besoins clés du client
  - Définir les attributs du système
  - Inclure les limites et les possibilités initiales du système !
  - C'est probablement l'étape la plus dure !
  - On doit impliquer le client !

- Analyse de faisabilité
  - Identifier les approches possibles de niveau système
  - Evaluer les approches les plus probables en se basant sur
    - Performance
    - Efficacité
    - Maintenance et entretien
    - Critères économiques
  - Tenir compte des contraintes de ressources.
- Analyse des exigences
  - Exigences opérationnelles

- Maintenance et Entretien
- Mesures Techniques de Performance (TPM)
- Analyse Fonctionnelle et Allocation
- Analyse, Synthèse et Evaluation
- Spécification du système

La spécification du système inclut l'information depuis :

- Analyse de faisabilité
  - Exigences opérationnelles
  - Concept de maintenance et d'entretien
  - Analyse fonctionnelle et allocation
  - La spécification du système inclut les caractéristiques techniques, opérationnelles, de performance et d'entretien du système comme une entité.
  - Elle inclut l'allocation des exigences de domaines fonctionnels, et elle définit les différentes interfaces entre les domaines fonctionnels
  - Revue de l'étude conceptuelle
- Programmée avec le client
- Enoncé de besoins
  - Analyse de faisabilité
  - Discuter le planning avancé du système

## 2- Etude (Design) préliminaire

- Analyse Fonctionnelle du système
  - Le processus de traduction des exigences du système en critères de design détaillés
  - Spécifier le « Quoi » qui doit être accompli pour réaliser les objectifs désirés, et non le « Comment »
  - Les fonctions opérationnelles mènent aux fonctions de maintenance et de support
- Allocation des exigences
  - L'identification des exigences spécifiques de ressources au niveau des sous systèmes et au dessous.
  - La conversion au « Comment » est accomplie par l'évaluation de chaque bloc fonctionnel individuel.
- Exigences de design
  - Design pour
    - Aptitude fonctionnelle
    - Fiabilité
    - Maintenabilité
    - Utilisabilité et sécurité (Facteurs humains)
    - Supportabilité et servicibilité
    - Productibilité et disposabilité
    - Abordabilité
- Technologies de design
  - Design pour
    - CAED (Computer Aided Engineering Design)
    - Modèles et outils analytiques
  - Computer Aided Engineering Design
    - CAD (CAO) Computer Aided Design
    - CAM (PAO) Computer Aided Manufacturing
  - Modèles et outils analytiques
    - Modèles économiques
    - Modèles d'optimisation



- Modèles descriptifs
- Synthèse et définition du design
  - La synthèse est la combinaison et la structuration des composants de telle manière à représenter une configuration faisable de système
  - Une configuration allocataire de base est développée en vue de basculer vers le design détaillé et développement
- Revue du design préliminaire  
Programmée avec le client

### 3 - Etude (Design) détaillée

- Conception (design) du système/produit
- Développement du prototype
- Test et évaluation du prototype

### 4- Production

- Estimation et évaluation du système/produit
- Modification pour:
  - Action corrective
  - Amélioration

### 5- Utilisation et entretien

### 6- Mise à l'arrêt et élimination

- Design orienté élimination
- Ingénierie verte

## III- La mise en place de dispositif e-learning et l'IS

### A- Aspects de mise en place de dispositif e-learning

Il existe plusieurs méthodes de mise en place de dispositif de formation en ligne. On retrouve souvent dans ces méthodes:

- L'identification des objectifs poursuivis par le développement du nouveau système.
- L'identification et l'analyse des différents types d'utilisateurs prévus, et l'analyse de leur tâche au moyen d'un formalisme approprié.
- L'analyse du contexte (p. ex., aspects organisationnels, contraintes et possibilités techniques).
- La conception globale (composants principaux, structure, navigation, etc.). À cette étape, il est souvent possible et judicieux de réutiliser, si la situation le justifie, des modèles (ou architectures) de dispositif qui ont été utilisés avec succès pour des situations similaires.
- La conception détaillée. Cette conception détaillée fait appel, entre autres, à des connaissances pointues sur les règles et les normes de conception de dispositif e-learning
- Des tests du dispositif au moyen de méthodes et de tests d'utilisabilité.

Comme indiqué ci-dessus, la conception et les tests de dispositif e-learning, sont de nature itérative. La conception et la spécification de dispositif e-learning aboutissent ainsi à un ensemble d'exigences relatives non seulement à l'aspect (couleur, taille, disposition, etc.) des éléments du dispositif mais, et de façon bien plus importante, à la définition des fonctions que devra fournir le futur système. On influence ainsi de façon directe et majeure l'architecture du

futur système. Par exemple, on identifie la plupart des fonctions du futur système et on détermine comment et par qui (humain ou machine) elles seront effectuées.

## ***B- Complémentarité entre l'IS et la mise en place de dispositif e-learning***

L'IS traite de tous les aspects du développement d'un système, incluant le déploiement et la mise au rancart éventuel, alors que la mise en place de dispositif e-learning s'arrête à la phase test et utilisation.

Toutefois, on note que l'IS et le e-learning partagent plusieurs principes, par exemple « connaître le problème, les clients, les utilisateurs... utiliser les critères basés sur les besoins à réaliser... décisions... Etablir et gérer... identifier les alternatives ... pour converger vers une solution... Vérifier et valider les besoins et les performances des résultats ».

Une des particularités de la mise en place de dispositif e-learning est de faire une large place à certaines techniques éprouvées, susceptibles de fournir des informations de première importance pour la définition du futur système. Par exemple:

- La collecte d'informations sur le terrain.
- L'identification des stratégies de traitement des informations et de prise de décision par les opérateurs.
- L'utilisation de maquettes du système proposé pour valider d'abord les besoins à satisfaire et ensuite les détails du dispositif. Une maquette est un modèle très simple, souvent sur papier ou sur support informatique mais avec un minimum de programmation, visant à donner l'illusion du système proposé. Cette dernière technique est particulièrement importante et facilite:
  - la communication entre les clients et les concepteurs en utilisant une même conceptualisation des solutions proposées dans les documents de spécification,
  - le traitement de plusieurs aspects d'un même problème à l'aide de simulation, à très bas coût, de l'utilisation du système proposé,
  - la transmission claire des exigences aux équipes de développement; sinon, il est très difficile pour un concepteur de systèmes d'extraire d'une description textuelle des exigences les informations requises pour le nouveau système. La maquette peut alors compléter et, dans certains cas, se substituer à une description textuelle des exigences.

Une meilleure compréhension du processus d'IS pourrait permettre aux développeurs de dispositif e-learning de s'intégrer de façon plus harmonieuse au sein des équipes de développement en leur donnant une meilleure connaissance des impératifs et des contraintes liés à la conception de systèmes.