

Ingénierie et architecture des
systèmes pluridisciplinaires

Volume 1

MOTIONS DE SYSTÈME ET D'INGÉNIERIE DE SYSTÈME

ALAIN FAISANDIER



Sinergy'Com

Guides
pratiques

COPYRIGHT

Copyright © 2014 Sinergy'Com

Tous droits réservés. Aucune partie de cet ouvrage ne peut être reproduite, ni stockée dans un système de recherche informatique, ou transmise sous quelque moyen électronique, mécanique, photocopie, scanner ou autre, sans la permission écrite de l'éditeur.

Les permissions peuvent être demandées directement à l'éditeur Sinergy'Com.

Sinergy'Com
2 chemin de la Serre
31450 BELBERAUD – France
Vox: +33561279861
contact@sinergycom.net

ISBN: 979-10-91699-05-1

Ce livre est aussi disponible au format e-book pdf.

AVANT PROPOS

Objet du présent volume

"L'innovation est peut être le facteur le plus important qui freine la compétitivité dans de nombreux pays. L'incapacité à *traduire les idées par des produits et des services* de haute valeur est un problème qui frappe de plus en plus les économies avancées et émergentes. Il devient crucial d'élever le potentiel innovant des entreprises, en appuyant la *création d'idées nouvelles* et en favorisant un climat d'affaires stimulant, pour débloquer la productivité, contribuer à une meilleure diffusion mondiale des connaissances et créer de meilleures et de plus nombreuses *opportunités* pour tous." - Benat Bilbao, Economiste principal du réseau mondial de compétitivité et d'analyse comparative du World Economic Forum.

Benat Bilbao et ses collègues économistes ont une vue très juste sur les freins de la compétitivité, notamment sur le facteur de l'innovation. Il est effectivement fondamental de favoriser les conditions économiques et sociales qui permettent la création de nouvelles idées. Encore faut-il que les acteurs concernés connaissent et appliquent les méthodes pour trouver de nouvelles idées, et pour transformer ces idées, à coup sûr, en produits et services de haute valeur.

L'ingénierie de système est par excellence la discipline technique qui permet la création d'idées nouvelles et leur transformation en produits, services et organisations.

Les conditions économiques ne sont pas suffisantes pour innover ; elles sont nécessaires en tant que moyens ou ressources. Il faut aussi des compétences techniques et technologiques, utilisées par des personnes motivées et formées. Mais ces deux axes (économique et humain) ne sont pas suffisants. Il manque un troisième axe, celui des méthodes. Il nous faut un triptyque équilibré pour que l'innovation, tant souhaitée, puisse fonctionner. En effet, imaginons un groupe de personnes possédant un seul ou deux de ces trois axes :

- Les ressources financières peuvent être dépensés ; elles permettent d'agir. Mais dépenser et agir pour faire quoi ?
- Les compétences techniques et technologiques permettent de réaliser des produits et des services. Mais quels produits, quels services, pour quelle utilité, pour qui, à quel prix, pour quel retour, à quels risques, en combien de temps, etc.? Et sans moyens économiques, il n'est pas possible de réaliser les produits et les services.
- Les méthodes permettent d'organiser les activités et les acteurs, d'optimiser l'utilisation de ressources, d'évaluer des solutions, de gérer des moyens, de résoudre des problèmes, etc. Mais sans compétences techniques et technologiques, on n'a rien à organiser. Avec des compétences techniques et des méthodes, mais sans moyens économiques, on reste dans le virtuel, dans les idées.

L'association des méthodes de l'ingénierie et de la vision système permet d'englober le triptyque "économie – humain/compétence – méthode" sous le vocable "ingénierie des systèmes" ou "ingénierie de système".

L'ingénierie de système est une méthodologie pour identifier des problèmes complexes, pour relever des défis vis à vis d'opportunités, et pour trouver des solutions en terme de systèmes. Elle consiste à :

- ◆ Etablir la compatibilité fonctionnelle et organique de la solution avec les besoins, les attentes et les contraintes représentant le problème ou l'opportunité.

- ◆ Equilibrer l'économie globale de la solution sur tous les aspects et étapes de la vie du système.
- ◆ Chercher l'équilibre entre les attentes, les contraintes, les performances, l'efficacité, les coûts, les délais d'obtention et les risques inhérents à la solution.

Ce volume, dédié aux notions de système et d'ingénierie de système, fait partie de la collection "Ingénierie et architecture des systèmes pluridisciplinaires". Il présente une vue générale de l'ingénierie de système, ses fondamentaux, et les moyens de sa mise en œuvre et de son déploiement. La connaissance de ces fondamentaux et de leur mise en œuvre permet d'éviter certains écueils de haut niveau, qui "plombent" souvent, hélas, de nombreux projets, produits, services ou organisations de toutes sortes, non seulement dans le domaine industriel, mais dans tous les domaines de la société civile.

Contenu du présent volume

Le présent volume aborde la notion fondamentale de **système**, en différenciant nettement ce domaine de celui des technologies, telles que mécanique, électronique, informatique, chimie, ergonomie, etc. Il en décrit les particularités, les conséquences sur son **ingénierie**, ainsi que sur les méthodes ou techniques d'analyse et de modélisation classiques. Sont explicités :

- ◆ La notion de système : des définitions, les particularités, la vision système généralisée, la notion de système de systèmes, l'utilité de la notion de système, la notion de système contributeur (enabling system), l'application à des produits, services, entreprises, organisations.
- ◆ Une vue générale de l'ingénierie de système : un bref historique, une clarification terminologique et la source du terme ingénierie, des définitions et propriétés, la place de l'ingénierie dans le cycle de vie du système, le mécanisme de création intellectuelle.
- ◆ La mise en œuvre de l'ingénierie de système : les standards internationaux et le guide du corpus de connaissance en ingénierie de système (SEBoK) ; la notion de processus, les processus de développement, la description synthétique des principaux processus concernés ; les notions d'ingénierie descendante, de rétro-ingénierie et de réingénierie ; les techniques de modélisation et de représentation ; l'organisation des activités d'ingénierie, des éléments d'ontologie, l'outillage.
- ◆ Le management du cycle de vie : la notion de cycle de vie, le projet de développement du système, le management de projet par rapport à l'ingénierie.
- ◆ L'ingénierie de système et l'ingénierie des technologies : le passage du système aux technologies, le cas de l'ingénierie du logiciel.
- ◆ Des écueils, des bonnes pratiques, des recommandations, des FAQ, une étude de cas en guise d'illustration de certaines activités du cœur de l'ingénierie.

SOMMAIRE

AVANT PROPOS.....	1
1 INTRODUCTION.....	13
2 TERMINOLOGIE.....	16
2.1 Termes et définitions.....	16
2.2 Abréviations.....	26
3 NOTION DE SYSTEME, PRINCIPES FONDATEURS.....	27
3.1 Définitions de la notion de système.....	28
3.1.1 Sources du terme système, premières définitions.....	28
3.1.2 Définitions de système complexe.....	29
3.1.3 La définition retenue de système.....	31
3.2 Systèmes pluridisciplinaires.....	32
3.3 Les caractéristiques du système.....	34
3.3.1 Trois points de vue majeurs du système.....	34
3.3.2 Récursivité de la définition de système.....	37
3.3.3 Différences entre finalité, mission et objectifs - exemples.....	40
3.3.4 Système : un ensemble de relations avec le contexte.....	41
3.3.5 Système : une dynamique et une autonomie.....	42
3.3.6 Système : des propriétés émergentes.....	44
3.4 Vision système généralisée.....	46
3.4.1 Encapsulation des systèmes.....	46
3.4.2 Décomposition et composition d'un système en systèmes.....	48
3.5 Notion de système de systèmes.....	51
3.5.1 Problématique autour de la notion de système de systèmes.....	51
3.5.2 Caractéristiques du système de systèmes.....	53
3.6 Utilité de la notion de système.....	55
3.6.1 Intérêt de la vision système (system thinking).....	55
3.6.2 Conséquences de la définition retenue de système.....	57
3.6.3 Limites de la notion de système.....	60
3.7 Notion de système contributeur (enabling system).....	66
3.8 Application de la définition de système à des types de système.....	69
3.8.1 Application à un système-produit ou système technologique.....	70
3.8.2 Application à un système-service.....	71
3.8.3 Application à un système-entreprise.....	73
3.8.4 Application à un système-organisation (un organisme).....	74
3.8.5 Considérations particulières pour l'application aux organisations.....	77
4 INTRODUCTION A L'INGENIERIE DE SYSTEME.....	79
4.1 Bref historique de l'ingénierie de système.....	80
4.2 Clarifications terminologiques.....	84
4.3 Caractérisation de l'ingénierie de système.....	86
4.3.1 De l'idée maîtrisée à la réalisation maîtrisée.....	86
4.3.2 Place de l'ingénierie dans le cycle de vie du système.....	87
4.3.3 Cas d'utilisation de l'ingénierie de système.....	89
4.3.4 Définition et propriétés de l'ingénierie de système.....	91
4.4 Démarches et principes d'ingénierie de système.....	95
4.4.1 Ingénierie descendante, rétro-ingénierie, réingénierie.....	95
4.4.2 Séparation de l'espace du problème et de l'espace de la solution.....	99
4.4.3 Liens de causalité entre les activités d'ingénierie.....	100
4.4.4 Continuité transformationnelle et ruptures sémantiques.....	104

4.4.5	Ingénierie intégrée et ingénierie simultanée	106
4.5	Ingénierie de système et démarches de développement	110
4.6	Mécanisme de création intellectuelle	117
4.6.1	Un modèle de comportement mental	118
4.6.2	Mécanisme de création et activités d'ingénierie de système	119
5	MISE EN ŒUVRE DE L'INGENIERIE DE SYSTEME	123
5.1	Vue globale des moyens de mise en œuvre	124
5.2	Description de quelques standards	126
5.2.1	ANSI/IEEE 1220 – Standard for Application and Management of the Systems Engineering Process	126
5.2.2	ANSI/EIA 632 – Processes for Engineering a System	128
5.2.3	ISO/IEC/IEEE 15288 – System Life Cycle Processes	129
5.2.4	ISO 10303 – AP233 Systems engineering	133
5.3	Corpus de connaissance – SEBoK	134
5.4	Processus du cycle de vie	140
5.4.1	Notion de processus générique	140
5.4.2	Catégories de processus et cartographie	143
5.4.3	Organisation d'entreprise par les processus	151
5.4.4	Relations entre les processus	152
5.5	Ontologie pour l'ingénierie de système	162
5.5.1	Ontologie pour le développement	162
5.5.2	Ontologie pour la définition	164
5.6	Processus de définition des concepts et du système	166
5.6.1	Orientation des processus de définition	166
5.6.2	Processus d'analyse d'affaire et/ou de mission	168
5.6.3	Processus de définition des besoins et des exigences de partie prenante	178
5.6.4	Processus de définition des exigences système	183
5.6.5	Processus de définition de l'architecture logique	192
5.6.6	Processus de définition de l'architecture physique	203
5.6.7	Processus de définition du design d'un constituant	215
5.6.8	Processus d'évaluation des propriétés du système	218
5.7	Autres processus de développement	221
5.7.1	Processus de réalisation d'un constituant	221
5.7.2	Processus d'intégration du système	223
5.7.3	Processus de vérification	226
5.7.4	Processus de validation	229
5.8	Techniques de représentation et méthodes	232
5.8.1	Techniques de modélisation	232
5.8.2	Relations inter-modèles	243
5.8.3	Modélisation, simulation, expérimentation	245
5.8.4	Utilisation de SysML	246
5.8.5	Utilisation des cadres d'architecture	252
5.8.6	Méthodes et aides à l'ingénierie	268
5.9	Outils	272
6	CYCLE DE VIE ET INGENIERIE DU SYSTEME	275
6.1	Cycle de vie et cycle de développement	276
6.1.1	Notion de cycle de vie	276
6.1.2	Modèles de cycle de développement	279
6.2	Cycle de vie et processus	284
6.3	Management de projet et ingénierie de système	286
6.3.1	Axe technique et axe management	286
6.3.2	Processus de management de projet	287
6.3.3	Maîtrise de l'avancement et de la maturité	288
6.3.4	Mise en œuvre de la notion de bloc-système	291

6.4	Management de programme et ingénierie de système.....	295
6.5	Ingénierie du système et ingénierie des technologies	298
7	DEPLOIEMENT DE L'INGENIERIE DE SYSTEME.....	301
7.1	Approche générale du déploiement	302
7.2	Mise en œuvre du déploiement.....	303
8	DES REFERENCES	305

3 NOTION DE SYSTEME, PRINCIPES FONDATEURS

Ce chapitre présente les fondamentaux relatifs à la notion de système qu'il faut connaître pour pouvoir faire l'ingénierie d'un système quelconque : une définition, les vues d'un système, les caractéristiques importantes d'un système par rapport à d'autres éléments, son utilité, la vision système, son application à des exemples.

Ce chapitre traite des sujets suivants :

- ◆ Les définitions de la notion de système – 3.1
- ◆ Les systèmes pluridisciplinaires – 3.2
- ◆ Les caractéristiques du système – 3.3
- ◆ La vision système généralisée – 3.4
- ◆ La notion de système de systèmes – 3.5
- ◆ L'utilité et les limites de la notion de système – 3.6
- ◆ La notion de système contributeur – 3.7
- ◆ L'application de la définition retenue à des exemples – 3.8

4 INTRODUCTION A L'INGENIERIE DE SYSTEME

Ce chapitre présente la notion d'ingénierie de système, sa place dans le cycle de vie du système, les définitions existantes, ses principales caractéristiques et propriétés. Il explicite les démarches de développement par intégration et ingénierie, en donne les utilisations appropriées. Il explique ce que recouvrent et contiennent les notions d'ingénierie intégrée et d'ingénierie simultanée.

Ce chapitre se termine par la description d'un modèle du mécanisme de création intellectuelle qui préfigure et justifie le contenu des activités d'ingénierie et leur découpage en processus.

Ce chapitre aborde les sujets suivants :

- ◆ Un bref historique de l'ingénierie de système – 4.1
- ◆ Des clarifications terminologiques – 4.2
- ◆ La caractérisation de l'ingénierie de système – 4.3 qui inclut :
 - Le passage de l'idée à la réalisation – 4.3.1
 - La place de l'ingénierie dans le cycle de vie – 4.3.2
 - Les cas d'utilisation de l'ingénierie de système – 4.3.3
 - Des définitions et propriétés – 4.3.4
- ◆ Les démarches et principes de l'ingénierie de système – 4.4 qui inclut :
 - L'ingénierie descendante, la rétro-ingénierie, la réingénierie – 4.4.1
 - La séparation des espaces du problème et de la solution – 4.4.2
 - Les liens de causalité entre les activités d'ingénierie – 4.4.3
 - La continuité transformationnelle et les ruptures sémantiques – 4.4.4
 - L'ingénierie intégrée et l'ingénierie simultanée – 4.4.5
- ◆ L'ingénierie de système et les démarches de développement – 4.5
- ◆ Un modèle du mécanisme de création intellectuelle – 4.6

5 MISE EN ŒUVRE DE L'INGENIERIE DE SYSTEME

Ce chapitre est le cœur du présent volume. Il présente l'ensemble des moyens nécessaires pour mettre en œuvre l'ingénierie de système sur des projets concrets : les standards, les processus, l'ontologie, les techniques de modélisation, et l'outillage. Ces moyens sont décrits de façon synthétique, et des éléments de discussions, ou des explications complémentaires, ou des avis critiques sont donnés pour permettre au lecteur d'acquérir une connaissance rapide et pertinente. Des renvois à d'autres volumes de cette collection, et à d'autres ouvrages, sont indiqués pour approfondir les notions et la mise en œuvre.

Ce chapitre présente :

- ◆ Une vue globale des moyens de mise en œuvre – 5.1
- ◆ La description de quelques standards internationaux – 5.2
- ◆ Le guide du corpus de connaissances SEBoK – 5.3
- ◆ L'approche par processus génériques et leur cartographie – 5.4
- ◆ Des éléments d'ontologie – 5.5
- ◆ La description des processus de définition des concepts et du système – 5.6
- ◆ La description des autres processus du développement – 5.7
- ◆ Quelques techniques de modélisation et méthodes – 5.8
- ◆ L'outillage – 5.9

6 CYCLE DE VIE ET INGENIERIE DU SYSTEME

Ce chapitre décrit les différences et les relations entre l'ingénierie de système, le cycle de vie du système, le management de programme, le management de projet, et l'ingénierie des technologies.

Ce chapitre présente :

- ◆ Les notions de cycle de vie et de cycle de développement – 6.1
- ◆ La position des processus d'ingénierie dans le cycle de vie – 6.2
- ◆ La différence entre management de projet et ingénierie de système et leur complémentarité – 6.3
- ◆ Comment l'ingénierie de système s'inscrit dans le management de programme – 6.4
- ◆ Le passage de l'ingénierie du système à l'ingénierie des technologies qui le composent – 6.5

7 DEPLOIEMENT DE L'INGENIERIE DE SYSTEME

Ce chapitre tient lieu de conclusion du présent volume. Il présente les grandes lignes du déploiement de la discipline d'ingénierie de système dans un organisme ou dans une entreprise.

Ce chapitre décrit :

- ◆ L'approche générale du déploiement – 7.1
- ◆ La mise en œuvre du déploiement – 7.2

8 DES REFERENCES

Les livres et documents suivants peuvent apporter au lecteur des compréhensions complémentaires, des certitudes, des détails ou des synthèses. Certains des ouvrages suivants sont cités dans le présent volume.

Livres en anglais :

- ◆ [Faisandier1 2013] Faisandier Alain 2013. Systems Opportunities and Requirements. Belberaud, France : Sinergy'Com. www.sinergycom.net
- ◆ [Faisandier2 2013] Faisandier Alain 2013. Systems Architecture and Design. Belberaud, France : Sinergy'Com. www.sinergycom.net
- ◆ [Lawson 2010] Lawson Harold. 2010. Systems Thinking and Systems Engineering series. Volume 1, A Journey Through the Systems Landscape. King's College London, UK. College Publications.
- ◆ [Friedenthal 2011] Friedenthal, Sanford; Moore, Alan; Steiner, Rick. 2011. A Practical Guide to SysML. Morgan Kaufmann Publishers. Burlington, MA: Elsevier.
- ◆ [Maier 2009] Maier, M., and E. Rechtin. 2009. The art of systems architecting. 3rd ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press.
- ◆ [Miller 1956] George A. Miller. The Magical Number Seven, Plus or Minus Two: Some Limits on our Capacity for Processing Information [archive]. The Psychological Review, 1956, vol. 63, Issue 2, pp. 81-97.
- ◆ [Thome 1993] Thome, B. 1993. Systems engineering, principles & practice of computer-based systems engineering. New York, NY: Wiley.

Livres en français :

- ◆ [LeMoigne 2006] Le Moigne Jean-Louis. 2006. La théorie du système général; théorie de la modélisation. France : www.mcxapc.org
- ◆ [Meinadier 1998] Meinadier Jean-Pierre. 1998. Ingénierie et intégration des systèmes. Paris: Hermes.
- ◆ [Meinadier 2002] Meinadier Jean-Pierre. 2002. Le métier d'intégration des systèmes. Paris: Hermes-Lavoisier.
- ◆ [Penalva 1997] Penalva, Jean-Michel. 1997. La modélisation par les systèmes en situation complexe. Thèse Université. Paris XI Orsay.
- ◆ [Roques 2009] Roques, Pascal. 2009. SysML par l'exemple. Paris: Eyrolles.

Standards, manuels, corpus de connaissances :

- ◆ DOD Architecture Framework, DOD, version 2.02 available from US DOD at <http://cio-nii.defense.gov/sites/dodaf20/>
- ◆ [INCOSE 2014] INCOSE Systems Engineering Handbook: A Guide for System Life Cycle Processes and Activities". 2014. San Diego, CA, USA: International Council on Systems Engineering (INCOSE), à paraître.
- ◆ [ISO 15288] Systems and software engineering - system life cycle processes. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization (ISO)/International Electrotechnical Commission (IEC), ISO/IEC 15288:201x. À paraître

- ◆ [ISO 24748] Systems and software engineering - system life cycle processes. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization (ISO)/International Electrotechnical Commission (IEC), ISO/IEC 24748:201x. Part 1, 2, 3. À paraître
- ◆ [NASA 2007] NASA. 2007. Systems engineering handbook. Washington, D.C.: National Aeronautics and Space Administration (NASA), NASA/SP-2007-6105.
- ◆ [PMBOK 2004] Project Management Body of Knowledge. Project Management Institute. <http://www.pmi.org/PMBOK-Guide-and-Standards.aspx>
- ◆ [SEBoK 2013] Guide to the Systems Engineering Body of Knowledge – version 1.2 – 2013 – <http://www.sebokwiki.org>
- ◆ [SysML 2010] OMG Systems Modeling Language – specification – version 1.2 – July 2010 – http://www.omg.org/technology/documents/spec_catalog.htm
- ◆ [SWEBOK 2004] Systems and software engineering – Guide to the Software Body of Knowledge. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization (ISO)/International Electrotechnical Commission (IEC), ISO/IEC 19759:2005

Sites web :

- ◆ [Zachman website] <http://www.zachman.com/about-the-zachman-framework>
- ◆ [TOGAF website] <http://www.opengroup.org>
- ◆ [MODAF website] MOD Architectural Framework, UK MOD. Available from UK MOD at <http://www.mod.uk/DefenceInternet/AboutDefence/WhatWeDo/InformationManagement/MODAF/>