

Ingénierie et architecture des  
systèmes pluridisciplinaires

Volume 4

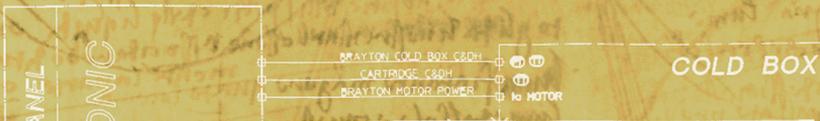
# EVALUATION ET PREUVE DU SYSTEME

ALAIN FAISANDIER



Sinergy'Com

Guides  
pratiques



## **COPYRIGHT**

Copyright © 2017 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](mailto:contact@sinergycom.net)

ISBN: 979-10-91699-08-2

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

# AVANT PROPOS

## Objet du présent volume

Les enjeux économiques, sécuritaires et sociétaux des systèmes créés par les êtres humains sont tels que leur validation finale doit être acquise avant la réception. Ces enjeux justifient à eux seuls la mise en place des activités d'évaluation, de vérification et de validation au plus tôt et tout au long du développement. Les coûts de vérification et de validation peuvent devenir si lourds qu'il est nécessaire d'en rationaliser l'approche afin de produire les effets attendus avec une efficacité maximale.

Les activités de justification, de validation et de vérification visent à donner confiance à toutes les parties engagées, en constatant que le système (produit, service, organisation) est conforme aux exigences requises et respecte les caractéristiques architecturales et les propriétés de design attendues.

**L'ensemble des activités d'évaluation, de justification, de vérification et de validation représente le nœud support de l'ingénierie, auquel toutes les autres activités du développement doivent faire appel afin de prendre des décisions techniques pertinentes.**

Face à un problème quelconque, la démarche naturelle de tout individu est de trouver une solution, le plus vite possible. Car le simple fait de poser un problème, ou une question, crée un vide ; or la nature tente de combler ce vide le plus vite possible pour retrouver un certain état d'équilibre, stable, dans lequel il n'y a plus de problème.

Un ingénieur est théoriquement capable de trouver une solution à une question technique ou un problème qui n'a jamais été résolu. Sans connaissance de l'ingénierie, et sans formation à toutes ses composantes, le réflexe de l'ingénieur est le même que tout autre individu. Il cherche dans sa tête, dans ses connaissances, ou dans les objets qui l'entourent, des éléments pour définir une solution, et la matérialiser rapidement. Ceci, sans effectuer forcément des évaluations et des vérifications très poussées quant à la faisabilité ou la pertinence de cette solution.

Tout ingénieur confirmé devrait connaître le processus de création dans ses détails, c'est à dire la discipline d'ingénierie, afin de répondre au problème ou à la question posée, de façon progressive et certaine. Pour comprendre la démarche d'ingénierie, voici une métaphore : le problème ou la question est comme un tunnel noir sans lumière ou un labyrinthe, dans lequel l'être humain pénètre, mais qui contient potentiellement des obstacles, des pièges, plusieurs galeries. Certaines galeries conduisent à des sorties plus ou moins faciles ou adaptées, d'autres n'ont pas de sortie ; la "bonne" sortie est la "bonne" solution au problème ou la "bonne" réponse à la question posée. La démarche d'ingénierie consiste à allumer quelques lumières dans le tunnel, c'est à dire prendre connaissance de l'environnement présent, établir des plans pour franchir les obstacles, évaluer la solidité des parois des galeries, les consolider, vérifier la progression, etc., et tout ceci étape par étape, jusqu'à identifier la "bonne" sortie. La démarche d'ingénierie n'est pas naturelle, instinctive ou intuitive ; ce n'est pas seulement du bon sens. Elle est constituée de concepts, de principes et de techniques qu'il faut connaître, apprendre et utiliser.

La collection "Ingénierie et architecture des systèmes pluridisciplinaires" développe les concepts, principes et techniques de l'ingénierie :

- Le volume 1 [Faisandier4 2014] présente une vue générale de l'ingénierie, une sorte de résumé, de carte ou plan pour poser les repères, montrer les démarches, ainsi que les concepts les uns par rapport aux autres.

- Le volume 2 [Faisandier2 2013] explicite comment on identifie un besoin, une opportunité, une problématique ou une question, en caractérisant l'environnement, en élaborant des référentiels d'exigences de parties prenantes, des exigences ou des caractéristiques attendues applicables à un système potentiel qui serait capable de répondre à la problématique ou à l'opportunité.
- Le volume 3 [Faisandier3 2013] explique comment on définit des solutions alternatives architecturales et de design pour satisfaire le besoin ou l'opportunité, à partir, d'une part, des référentiels d'exigences, et d'autre part, de patterns ou modèles génériques correspondants à la problématique concernée.
- Le présent volume 4 explicite comment on évalue et vérifie les solutions alternatives, puis comment on vérifie, valide et justifie la définition de la solution retenue, ainsi que sa réalisation tangible.

**L'évaluation, la justification, la vérification et la validation ont en commun la notion de comparaison. Comparaison de solutions alternatives entre elles par rapport à des critères garantissant la sélection de la solution la plus pertinente (évaluation et justification) ; comparaison de la solution retenue par rapport à des référentiels de caractéristiques techniques (vérification) et opérationnelles (validation).**

Les activités d'évaluation, de justification, de vérification et de validation font partie intégrante de l'ingénierie. Mais elles sont transverses des activités de définition des référentiels d'exigences et de définition des solutions architecturales et de design. Plus généralement, elles sont transverses des activités de développement (définition des concepts, définition du système, réalisation et intégration des constituants tangibles du système) ; et encore plus généralement, elles sont transverses de l'ensemble des activités du cycle de vie du système, pour l'obtention et le maintien au cours du temps d'un produit, d'un service ou d'une organisation conforme aux besoins. Ces activités doivent être exécutées en coordination avec chacune des autres activités d'ingénierie, progressivement, et pas uniquement à la fin de la réalisation du système.

Afin de montrer l'articulation des activités de vérification et de validation sur l'ensemble du développement du système, ce volume traite aussi de l'intégration du système ; plus précisément de l'intégration des constituants réalisés du produit, du service ou de l'organisation correspondant au système étudié.

## Contenu du présent volume

Le présent volume est dédié à l'évaluation et à la preuve du système. Sont traités :

- ◆ **L'évaluation** et la **justification** des solutions alternatives du système étudié, qu'elles soient représentées par un ensemble de caractéristiques attendues (référentiels d'exigences), ou de modèles et de caractéristiques d'architecture et/ou de propriétés de design. Les évaluations sont effectuées par rapport à des critères, objectifs et subjectifs et/ou d'avis d'experts, qui dépendent du type de système étudié. Cette activité d'évaluation est nommée en anglais et dans les standards d'ingénierie de système "System Analysis" et/ou parfois "System Assessment".
- ◆ **La vérification** des entités d'ingénierie relatives au système étudié (exigences, fonctions, flux d'entrée-sortie, constituants tangibles, interfaces, agrégats d'intégration, système, etc.) ; vérification faite par rapport à leur propre référentiel de définition.
- ◆ **La validation** des mêmes entités d'ingénierie relatives au système étudié (exigences, fonctions, flux d'entrée-sortie, constituants tangibles, interfaces, agrégats d'intégration, système, etc.) ; validation faite par rapport à leur propre référentiel d'utilisation.

- ◆ **L'intégration** des constituants concrets du système pour construire le produit, le service ou l'organisation attendu, en suivant une démarche efficace. L'efficacité est obtenue par la coordination optimale et systémique des activités d'assemblage, de vérification et de validation. Coordination nommée **stratégie d'intégration, vérification, validation**.

## Contenu des autres volumes

La collection "Ingénierie et architecture des systèmes pluridisciplinaires" est composée de plusieurs volumes écrits dans un souci de cohérence, tant sur le plan terminologique que celui des notions, concepts et principes exposés. Les quatre premiers volumes sont en phase avec les ouvrages collectifs suivants : le guide du corpus de connaissance SEBoK [SEBoK 2016], le manuel INCOSE Handbook version 4 [INCOSE 2015], le standard ISO/IEC/IEEE 15288:2015 [ISO15288], les standards ISO/IEC 24748-1:2016 Guide for life cycle management [ISO 24748-1], ISO/IEC 24748-2:2016 Guide to the application of ISO/IEC 15288:2015 [ISO 24748-2], et ISO/IEC 24748-6:2016 System integration engineering [ISO 24748-6]. Les titres et résumés des volumes sont les suivants :

- ◆ Volume 1 - Notions de Système et d'Ingénierie de Système
  - Notion de système ; vision système ; principes relatifs à l'ingénierie de système ; les moyens pour la mise en œuvre ; les relations avec le management de projet et l'ingénierie des technologies ; le management du cycle de vie du système
- ◆ Volume 2 - Opportunités et Exigences des Systèmes
  - Analyse de mission ; analyse d'opportunité et d'affaire ; concepts opérationnels et concepts technologiques ; besoins et exigences de partie prenante; exigences techniques du système
- ◆ Volume 3 - Architecture et Conception des Systèmes
  - Définition de l'architecture logique du système ; définition de l'architecture physique du système ; modélisations et patterns ; conception du système et conception des constituants du système (System Element)
- ◆ Volume 4 - Évaluation et Preuve du Système (le présent volume)
  - Analyse des propriétés du système (System Analysis) ; vérification du système ; validation du système ; intégration du système
- ◆ Volume 5 - Ingénierie des Systèmes Sûrs et Résilients
  - Notions d'immunité, d'intégrité et d'innocuité appliquées aux systèmes pluridisciplinaires ; extension de l'ingénierie de système à l'ingénierie de la sécurité et de la sûreté ; approche intégrée ; approche FDIR et patterns de redondances ; évaluation des propriétés de la sûreté de fonctionnement
- ◆ Volume 6 - Management du Cycle de Vie du Système
  - Technologies de réalisation ; traitement de l'intégration, du déploiement, de la maintenance, du retrait de service en tant que systèmes contributeurs (enabling systems) ; synthèse du cycle de vie du système
- ◆ Volume 7 - Une ontologie pour l'ingénierie de système
  - Principes pour l'établissement d'un modèle de métadonnées ; schéma sémantique et ontologie d'ingénierie ; description détaillée du modèle des métadonnées d'ingénierie générique utilisées dans les autres volumes

# SOMMAIRE

AVANT PROPOS.....	1
1 INTRODUCTION.....	11
2 TERMINOLOGIE.....	14
2.1 Termes et définitions.....	14
2.2 Abréviations.....	28
3 RAPPELS ET EXTENSIONS DES FONDAMENTAUX POUR LE DEVELOPPEMENT DU SYSTEME.....	29
3.1 Notion de système.....	30
3.2 Processus pour définir les concepts et le système.....	36
3.3 Processus pour développer le système.....	40
3.3.1 Notion de bloc-système.....	40
3.3.2 Démarche de développement par processus et blocs-système.....	40
3.3.3 Démarche d'évaluation des propriétés du système.....	45
3.3.4 Démarche de vérification et de validation.....	46
3.4 Ontologie pour l'ingénierie de système.....	47
3.4.1 Ontologie pour le développement du système.....	47
3.4.2 Ontologie pour la définition du système.....	49
3.5 Création intellectuelle et sources d'erreurs.....	51
3.5.1 Un modèle de comportement mental.....	51
3.5.2 Mécanisme de création et activités d'ingénierie de système.....	52
3.5.3 Pertinence des démarches d'évaluation, de vérification et de validation au regard de la "fiabilité" humaine.....	55
4 EVALUATION DES PROPRIETES DU SYSTEME.....	61
4.1 Concepts et principes de l'évaluation.....	62
4.1.1 Etudes comparatives.....	62
4.1.2 Analyses de coût.....	67
4.1.3 Analyses de risque.....	73
4.1.4 Analyses d'efficacité.....	78
4.1.5 Critères d'évaluation.....	81
4.1.6 Classement des solutions candidates et optimisation.....	83
4.2 Approche processus.....	86
4.2.1 Localisation du processus dans le développement.....	86
4.2.2 Finalité, entrées et sorties du processus.....	87
4.2.3 Description des activités du processus.....	89
4.2.4 Eléments d'ontologie.....	92
4.2.5 Vérification et validation des évaluations.....	94
4.2.6 Artefacts - documentation.....	95
4.3 La mise en pratique.....	96
4.3.1 Modélisations applicables.....	96
4.3.2 Jugements d'experts et interviews.....	101
4.3.3 Exemple d'évaluation.....	104
4.3.4 Recommandations et foire aux questions.....	105
5 VERIFICATION ET VALIDATION DU SYSTEME.....	107
5.1 Concepts, principes, démarches.....	108
5.1.1 Définitions.....	108
5.1.2 Notion d'action de vérification et de validation.....	111
5.1.3 Techniques et méthodes de vérification et de validation.....	115

5.1.4	Panorama des vérifications et validations .....	122
5.1.5	Stratégie de vérification et de validation .....	129
5.2	Approche processus .....	138
5.2.1	Processus de vérification .....	138
5.2.2	Processus de validation .....	148
5.3	Mise en pratique .....	158
5.3.1	Traçabilité et matrice de justification .....	158
5.3.2	Technique d'inspection .....	164
5.3.3	Technique de revue de fin d'activité .....	166
5.3.4	Technique d'essai .....	170
5.3.5	Organisation des activités de vérification et de validation .....	195
5.3.6	Recommandations et foire aux questions .....	197
6	INTEGRATION DES CONSTITUANTS DU SYSTEME .....	201
6.1	Concepts et démarches d'intégration .....	202
6.1.1	Définitions et concepts .....	202
6.1.2	Démarches d'intégration .....	206
6.1.3	Stratégie d'intégration .....	209
6.1.4	Relations de l'intégration avec la vérification et la validation .....	218
6.2	Approche processus .....	222
6.2.1	Localisation du processus dans le développement .....	222
6.2.2	Finalité, entrées et sorties du processus .....	223
6.2.3	Description des activités du processus .....	224
6.2.4	Éléments d'ontologie .....	228
6.2.5	Artefacts - documentation .....	230
6.3	Mise en pratique .....	231
6.3.1	Hétérogénéité des constituants et complexité des interfaces .....	231
6.3.2	Notion de système contributeur d'intégration .....	234
6.3.3	Interfaçage avec les autres processus du développement .....	236
6.3.4	Recherche et élimination des défauts .....	239
6.3.5	Recommandations et foire aux questions .....	245
7	DES REFERENCES .....	247
8	ANNEXES .....	249
8.1	Document de Justification - Canevas et guide .....	249
8.2	Plan de vérification et de validation - Canevas et guide .....	257
8.3	Matrice de justification .....	261
8.4	Fiche d'action de vérification - validation .....	275
8.5	Procédure de vérification - validation .....	276
8.6	Fiche d'anomalie ou de non conformité .....	277
8.7	Fiche d'inspection de document .....	278
8.8	Fiche de problème .....	278
8.9	Plan d'intégration - Canevas et guide .....	279
8.10	Fiche de définition d'agrégat d'intégration .....	283
8.11	Procédure d'intégration .....	284

## FIGURES

Figure 1 - Un modèle de la définition de système .....	30
Figure 2 - Décomposition hiérarchique du système étudié (SBS) .....	33
Figure 3 - Encapsulation des systèmes avec leurs connexions .....	34
Figure 4 - Encapsulation du système étudié dans son contexte .....	34

### **3 RAPPELS ET EXTENSIONS DES FONDAMENTAUX POUR LE DEVELOPPEMENT DU SYSTEME**

Ce chapitre présente un rappel de certains fondamentaux explicités dans le volume 1 de cette collection [Faisandier4 2014], ainsi que des extensions nécessaires qu'il faut connaître pour développer correctement tout système (c'est à dire faire son ingénierie et son intégration) et maîtriser, via les démarches d'évaluation, de vérification et de validation, les erreurs potentiellement introduites.

Ce chapitre traite les sujets suivants :

- ◆ La notion de système - 3.1
- ◆ Les processus du cycle de vie pour définir les concepts opérationnels et le système - 3.2
- ◆ Les processus du cycle de vie pour développer le système - 3.3
- ◆ Les éléments d'ontologie pour l'ingénierie du système - 3.4
- ◆ Le mécanisme de création intellectuelle, et les sources d'erreurs - 3.5

## 4 EVALUATION DES PROPRIETES DU SYSTEME (SYSTEM ANALYSIS)

Ce chapitre présente l'ensemble des moyens nécessaires à l'exécution des activités d'évaluation des propriétés du système en cours de définition. Le processus d'évaluation fournit aux processus demandeurs les éléments d'analyse des propriétés du système, des arguments de justification en vue du choix de solutions alternatives.

Ce chapitre présente :

- ◆ Les concepts et principes de l'évaluation - 4.1 qui inclut :
  - Les études comparatives - 4.1.1
  - Les analyses de coût - 4.1.2
  - Les analyses de risque - 4.1.3
  - Les analyses d'efficacité - 4.1.4
  - Les critères d'évaluation - 4.1.5
  - Le classement des solutions candidates - 4.1.6
- ◆ L'approche processus - 4.2, qui inclut :
  - La localisation du processus dans le développement - 4.2.1
  - La finalité, les entrées et sorties du processus - 4.2.2
  - La description des activités du processus - 4.2.3
  - Les éléments d'ontologie - 4.2.4
  - La vérification et la validation des évaluations - 4.2.5
  - Les artefacts produits par le processus - 4.2.6
- ◆ La mise en pratique - 4.3, qui inclut :
  - Les méthodes et techniques de modélisation - 4.3.1
  - Le jugement d'experts - 4.3.2
  - Des exemples d'évaluation - 4.3.3
  - Des recommandations et FAQ - 4.3.4

## 5 VERIFICATION ET VALIDATION DU SYSTEME

Ce chapitre présente l'ensemble des moyens nécessaires pour effectuer les activités de vérification et de validation au cours du cycle de vie du système. Il met l'accent sur le développement du système, c'est à dire de son ingénierie et de son intégration.

Ce chapitre présente :

- ◆ Les concepts, principes et démarches de vérification et de validation - 5.1, qui inclut :
  - Les définitions - 5.1.1
  - La notion d'action de vérification et de validation - 5.1.2
  - Les techniques ou méthodes de vérification et de validation - 5.1.3
  - Un panorama des vérifications et validations - 5.1.4
  - La stratégie de vérification et de validation - 5.1.5
- ◆ L'approche processus - 5.2, qui inclut :
  - La localisation des processus - 5.2.1.1 et 5.2.2.1
  - La finalité, les entrées et sorties des processus - 5.2.1.2 et 5.2.2.2
  - La description des activités des processus - 5.2.1.3 et 5.2.2.3
  - Les éléments d'ontologie - 5.2.1.4 et 5.2.2.4
  - Les artefacts produits par les processus - 5.2.1.5 et 5.2.2.5
- ◆ La mise en pratique - 5.3, qui inclut :
  - La traçabilité et la matrice de justification - 5.3.1
  - Des exemples d'actions de vérification et validation - 5.3.1
  - La technique d'inspection - 5.3.2
  - La technique de revue de fin d'activité - 5.3.3
  - La technique d'essai - 5.3.4
  - L'organisation des activités et les responsabilités - 5.3.5
  - Des recommandations et FAQ - 5.3.6

## 6 INTEGRATION DES CONSTITUANTS DU SYSTEME

Ce chapitre présente les moyens nécessaires pour effectuer l'intégration des constituants qui composent le système.

Ce chapitre présente :

- ◆ Les concepts et démarches relatifs à l'intégration - 6.1 qui inclut :
  - Les définitions et concepts - 6.1.1
  - Les démarches d'intégration - 6.1.2
  - La stratégie d'intégration - 6.1.3
  - Les relations de l'intégration avec la vérification et la validation - 6.1.4
- ◆ L'approche processus - 6.2, qui inclut :
  - La localisation du processus dans le développement - 6.2.1
  - La finalité, les entrées et sorties du processus - 6.2.2
  - La description des activités du processus - 6.2.3
  - Les éléments d'ontologie - 6.2.4
  - Les artefacts produits par le processus - 6.2.5
- ◆ La mise en pratique - 6.3, qui inclut :
  - L'hétérogénéité des constituants et la complexité des interfaces - 6.3.1
  - La notion de système contributeur d'intégration - 6.3.2
  - L'interfaçage avec les autres processus du développement - 6.3.3
  - Des recommandations et FAQ - 6.3.5

## 7 DES REFERENCES

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

### Livres en anglais :

- a. [Faisandier1 2015] Faisandier Alain 2015. System Notion and Engineering of Systems. Belberaud, France : Sinergy'Com. [www.sinergycom.net](http://www.sinergycom.net)
- b. [Faisandier2 2013] Faisandier Alain 2013. Systems Opportunities and Requirements. Belberaud, France : Sinergy'Com. [www.sinergycom.net](http://www.sinergycom.net)
- c. [Faisandier3 2013] Faisandier Alain 2013. Systems Architecture and Design. Belberaud, France : Sinergy'Com. [www.sinergycom.net](http://www.sinergycom.net)

### Livres en français :

- d. [Faisandier4 2014] Faisandier Alain 2014. Notions de système et d'ingénierie de système. Belberaud, France : Sinergy'Com. [www.sinergycom.net](http://www.sinergycom.net)
- e. [Meinadier 1998] Meinadier Jean-Pierre. 1998. Ingénierie et intégration des systèmes. Paris: Hermes.
- f. [Meinadier 2002] Meinadier Jean-Pierre. 2002. Le métier d'intégration des systèmes. Paris: Hermes-Lavoisier.

### Standards, manuels, corpus de connaissances :

- g. [INCOSE 2015] INCOSE Systems Engineering Handbook: A Guide for System Life Cycle Processes and Activities. 2015. Fourth edition. WILEY. San Diego, CA, USA: International Council on Systems Engineering (INCOSE).
- h. [ISO 15288] Systems and software engineering - system life cycle processes. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization (ISO)/International Electrotechnical Commission (IEC), ISO/IEC 15288:2015
- i. [ISO 24748-1] Systems and software engineering - Life cycle management - Part 1: Guide for life cycle management. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization (ISO)/International Electrotechnical Commission (IEC), ISO/IEC 24748-1:2016.
- j. [ISO 24748-2] Systems and software engineering - Life cycle management - Part 2: Guide to the application of ISO/IEC 15288:2015. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization (ISO)/International Electrotechnical Commission (IEC), ISO/IEC 24748-2:2016.
- k. [ISO 24748-6] Systems and software engineering - Life cycle management - Part 6: System integration engineering. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization (ISO)/International Electrotechnical Commission (IEC), ISO/IEC 24748-6:2016.
- l. [NASA 2007] NASA. 2007. Systems engineering handbook. Washington, D.C.: National Aeronautics and Space Administration (NASA), NASA/SP-2007-6105.

### Sites web :

- m. [SEBoK 2016] Guide to the Systems Engineering Body of Knowledge - version 1.6 - 2016 ou version ultérieure. <http://www.sebokwiki.org>