

Cours d'ingénierie des systèmes complexe

Remaci Zeyneb Yasmina

Université Abou Baker Belkaid Tlemcen

Faculté des sciences

Département d'informatique

25.0 16/04/2026



I Introduction à l'ingénierie des systèmes

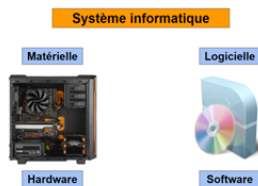
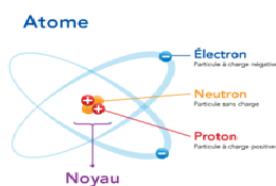
1. Introduction

Objectifs spécifiques

A la fin de ce chapitre vous allez être capable de :

- Définir ce qu'est un **système** (composants, interactions, finalité).
- Distinguer **finalité, mission et objectifs**.
- Comprendre le rôle de l'**ingénierie des systèmes** dans la gestion de la complexité.
- Identifier les **parties prenantes** et leurs rôles (MOA, MOE).
- Analyse et expression des besoins.
- Transformation des besoins en exigences.

Un système, C'est quoi?



$$\begin{cases} 3x - y = 1 \\ 2x + 3y = 19 \end{cases}$$

Système

Malgré la diversité des exemples (physique, informatique, industriel, mathématique), tous partagent les mêmes caractéristiques :

- un ensemble d'éléments
- des interactions entre ces éléments
- une organisation structurée
- un objectif ou un fonctionnement commun

□ **Définition : Un système**

On appelle système un assemblage, une collection organisée (possédant une structure) d'objets reliés ou branchés (en interrelation) les uns aux autres, de façon à former une entité ou un tout remplissant une ou plusieurs fonctions.

□ Complément :

Un système est un ensemble de **composants** interreliés qui interagissent les uns avec les autres d'une manière organisée pour accomplir **une finalité** commune.^{1 p.17}



□ Complément :

Un système est un ensemble intégré d'éléments qui accomplissent un objectif défini ^{1 p.18}.

□ Définition : La finalité d'un système

•La **finalité** est la raison de l'existence du système (pourquoi a-t-on fait ce système?). Elle justifie la décision de réaliser ce système pour résoudre un **problème**.

□ Exemple :

La finalité d'un véhicule automobile est d'assurer le transport individuel par voie terrestre des personnes (et de leurs biens)

□ Définition : La mission

est l'ensemble des services que le système doit fournir (Que fait le système? Que transforme-t-il?).

□ Définition : Les objectifs

•sont les éléments qui quantifient la mission et les services du système sous forme d'éléments ou de données mesurables relatifs à l'espace, au temps ou à l'efficacité.

□ Exemple : Système de voiture autonome

1.**Finalité**: est améliorer la sécurité routière en réduisant les accidents de la route causés par des erreurs humaines.

2.**Mission** :

1. Est de transporter des passagers d'un point A à un point B en toute sécurité, en évitant les obstacles et en respectant les règles de la route.
2. Les véhicules autonomes sont conçus pour être capables de naviguer de manière autonome dans diverses conditions de conduite, y compris la circulation urbaine, les autoroutes et les routes rurales.

3.**Objectifs** :

1. Réduire de 90 % les accidents liés à l'erreur humaine.
2. Améliorer de l'efficacité énergétique de 10 % ou plus par rapport aux véhicules conventionnels.
3. Economiser de 20 % à 30 % sur les coûts de transport.

□ **Attention** : Séparation de l'espace du problème et l'espace de solution.

• La séparation entre l'espace du problème et l'espace de solution est un principe fondamental en ingénierie des systèmes, en analyse des besoins et en conception logicielle. Elle permet d'éviter les erreurs de conception en distinguant clairement ce que l'on veut résoudre de comment on va le résoudre.

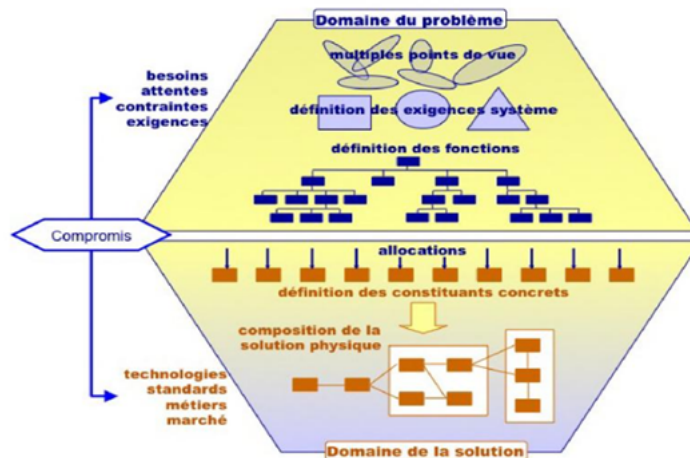


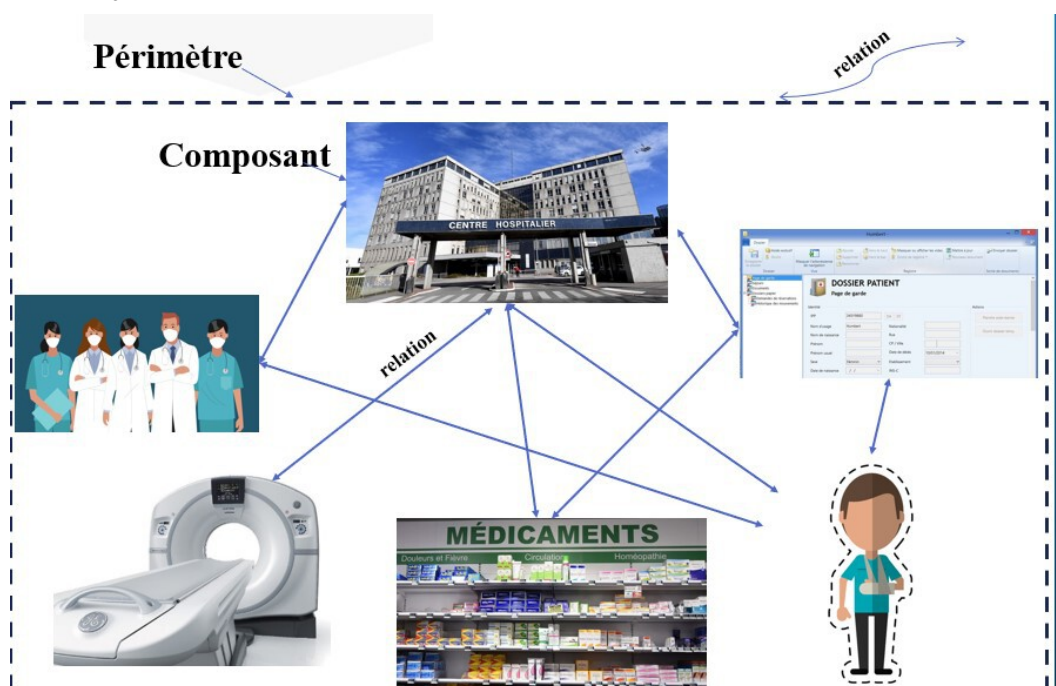
Figure 27 - Séparation de l'espace du problème de l'espace de la solution

□ **Définition** : Les caractéristiques d'un système.

- **Un contexte** : environnement dans lequel le système s'insère.
- **Un périmètre bien défini / frontière** : La frontière d'un système est une limite réelle ou fictive, partageant l'ensemble des composants considérés comme appartenant au système du reste, appelé milieu extérieur.
- **Un nombre fini de composants intégrés.**
- **Des relations internes** : entre chacun de ses composants (hiérarchique ou non)
- **Des relations externes** : le système interagit toujours avec l'extérieur.

□ **Exemple** :

Exemple d'un système médical.



Le diagramme représente un **système organisé** délimité par une frontière appelée **périmètre**.

À l'intérieur de ce périmètre se trouvent plusieurs **composants** qui interagissent entre eux grâce à différentes **relations**.

L'objectif est de montrer qu'un système n'est pas constitué d'un seul élément, mais d'un **ensemble d'entités interconnectées**.

2. Ingénierie des systèmes

□ **Définition : Ingénierie**

L'ingénierie désigne l'ensemble des fonctions qui mènent de la conception et des études, de l'achat et du contrôle de fabrication des équipements, à la construction et à la mise en service d'une installation technique ou industrielle^{2 p.18}.

□ **Définition : L'Ingénierie Système**

Est une démarche méthodologique (**systematique** ^{p.15}), coopérative et interdisciplinaire qui englobe l'ensemble des bonnes pratiques pour concevoir, faire évoluer et vérifier (de façon **holistique** ^{p.15}) un système apportant à temps une solution économique et performante aux besoins des parties prenantes et acceptable par tous^{3 p.18}.

Le livre ci-dessous est une **référence fondamentale en ingénierie des systèmes**. Il propose une **approche complète du cycle de vie des systèmes**, depuis l'identification d'un besoin jusqu'à la conception, l'analyse, l'évaluation, l'opération, le support et la mise hors service. Le livre couvre les **concepts, les méthodologies** ^{p.15}, **les modèles et les outils** essentiels pour comprendre et appliquer l'ingénierie des systèmes de manière systématique et interdisciplinaire. Il inclut des chapitres sur l'analyse des exigences, la conception conceptuelle, l'optimisation, la fiabilité, la maintenabilité, le soutien logistique, la planification des systèmes et la gestion de programme. L'approche met l'accent sur l'**intégration des parties prenantes**, l'évaluation itérative et l'amélioration des systèmes existants pour accroître leur **efficacité, leur valeur et leur satisfaction globale**.

(cf. systems-engineering-and-analysis-5th-edition-blanchard-solutions-manual.pdf)

□ **Fondamental : Pourquoi l'ingénierie ?**

1. Complexité croissante ;

- La **complexité croissante** désigne l'augmentation progressive de la difficulté dans la conception et la gestion des systèmes modernes.

Origine de la complexité : Les systèmes actuels deviennent plus complexes à cause de :

- l'augmentation du nombre de fonctionnalités,
- l'interconnexion entre plusieurs systèmes,
- l'intégration de différentes technologies,
- la gestion de grandes quantités de données,
- la diversité des utilisateurs et des environnements d'utilisation.

Conséquences : Cette complexité peut provoquer :

- des erreurs de conception,
- des difficultés de maintenance,
- des problèmes d'intégration,
- une augmentation des délais de développement.

Importance : Une approche méthodique permet de :

- structurer le système,
- décomposer le problème en sous-parties,
- mieux contrôler les interactions entre composants.

2. Optimisation des ressources :

Types de ressources concernées

- Ressources humaines (équipes de travail).
- Ressources matérielles (équipements, infrastructures).
- Temps.
- Budget financier.
- Énergie.

Objectifs

- Réduire le gaspillage.
- Améliorer la productivité.
- Maximiser les performances avec un minimum de moyens.

Résultat attendu : Une bonne optimisation permet :

- une meilleure organisation du travail,
- une réduction des efforts inutiles,
- une utilisation rationnelle des équipements.

3. Réduction des coûts à long terme :

Types de coûts

- coûts de développement,
- coûts d'exploitation,
- coûts de maintenance,
- coûts de correction des erreurs,
- coûts d'évolution du système.

Principe fondamental

Plus une erreur est détectée tardivement, plus sa correction devient coûteuse.

Avantages

Une conception bien planifiée permet :

- moins de corrections après mise en service,
- une maintenance simplifiée,
- une meilleure réutilisation des composants.

4. Gestion des risques :

Types de risques

- risques techniques,
- risques organisationnels,
- risques financiers,
- risques opérationnels,
- risques de sécurité.

Étapes de gestion

1. Identification des risques possibles.
2. Analyse de leur impact.
3. Évaluation de leur probabilité.
4. Mise en place de mesures préventives.
5. Suivi continu des risques.

Objectif

Réduire l'incertitude et éviter les défaillances majeures.

5. Amélioration de la qualité :

Critères de qualité

- fiabilité,
- performance,
- sécurité,
- facilité d'utilisation,
- maintenabilité,
- disponibilité.

Moyens utilisés

- validation des exigences,
- contrôles réguliers,
- tests fonctionnels et techniques,
- vérification et validation continues.

Résultat

Un système de qualité :

- fonctionne correctement,
- satisfait les utilisateurs,
- nécessite moins de corrections

6. Durabilité :

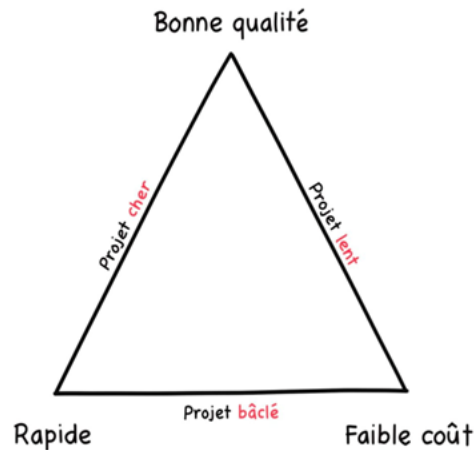
Dimensions de la durabilité :

- facilité d'évolution,
- adaptabilité aux nouvelles technologies,
- maintenance aisée,
- consommation optimisée des ressources.

Importance : Un système durable permet :

- des mises à jour simples,
- l'ajout de nouvelles fonctionnalités,
- une prolongation de la durée de vie du système.

Conséquence : Cela évite le remplacement complet du système après une courte période d'utilisation.



□ **Exemple : Les symptômes d'une faible IS**

Les symptômes d'une faible IS^{p.16} sont :

1. **L'échec du télescope spatial Hubble en 1990:** un miroir principal déformé, ce qui a entraîné des images floues.
2. **Le bug du système de vote électronique en Floride en 2000:** une conception défectueuse, ce qui a entraîné des bulletins de vote mal interprétés et des problèmes de comptage.
3. **Le problème du Boeing 737 MAX:** 346 décès en 2018 et 2019, en avril 2023, Boeing annonce de nouveaux retards de livraisons en raison d'un défaut de fabrication sur deux points pour la fixation de la dérive à l'arrière du fuselage.

□ **Exemple : Les symptômes d'une faible IS (Informatique)**

- Mauvaise gestion des exigences (requirements): 60-80 % des échecs de projet informatique sont attribuables à une mauvaise collecte, analyse ou gestion des exigences.
- Environ 42-43 % des échecs sont attribuables aux exigences mal définies ou mal gérées.
- 29 % des projets sont jugés succès complet, ~ 53 % sont « challengés » (retards, dépassements, fonctionnalités manquantes), et ~ 18 % échouent complètement.

□ **Complément : Les symptômes d'une faible IS**

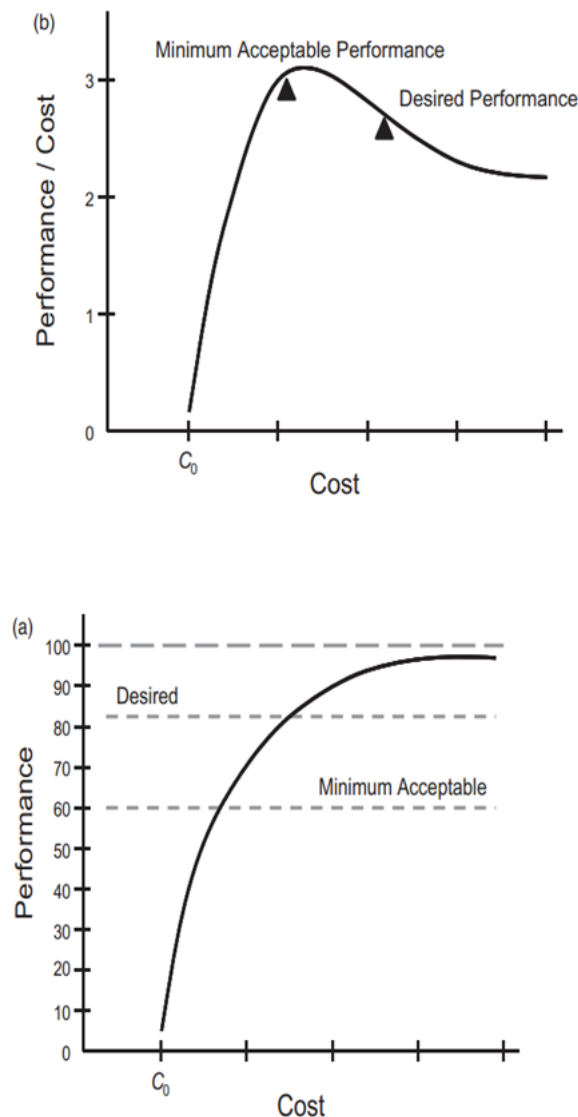
1. Retards.
2. Dépassement de budget.
3. Confusion concernant les exigences des missions du projet.
4. Non respect des contraintes techniques.
5. Conflits entre les équipes.
6. Insatisfaction des parties prenantes .

□ **Fondamental : Le « Meilleur » Système selon IS**

- Le meilleur est l'ennemi du suffisamment bon.
- L'ingénierie des systèmes est l'art du suffisamment bon.
- L'ingénierie des systèmes considère la performance comme un seul des attributs critiques parmi plusieurs autres.

- Les attributs tout aussi importants incluent l'accessibilité financière, la disponibilité en temps voulu pour l'utilisateur, la facilité de maintenance, et le respect du calendrier de développement convenu.

□ Exemple :



Ces deux graphiques illustrent la relation entre le coût et la performance selon deux perspectives complémentaires. Dans le premier graphique (a), la performance augmente lorsque le coût augmente à partir d'un seuil minimal C_0 . Au début, une petite augmentation du coût entraîne une amélioration importante de la performance. Ensuite, la courbe commence à se stabiliser : les gains deviennent de plus en plus faibles malgré l'augmentation des dépenses. Cela traduit le principe des rendements décroissants. Les lignes pointillées indiquent une performance minimale acceptable et une performance désirée, montrant qu'au-delà d'un certain niveau d'investissement, il n'est pas toujours pertinent de dépenser davantage si la performance supplémentaire obtenue est faible.

Dans le second graphique (b), on observe la performance rapportée au coût (Performance/Cost). Cette courbe montre qu'il existe un point optimal où le rapport performance/coût est maximal. Avant ce point, augmenter le coût améliore fortement l'efficacité. Après ce point, même si la performance peut encore augmenter légèrement, le rapport performance/coût diminue, ce qui signifie que chaque unité monétaire investie devient moins rentable. Ainsi, la décision optimale consiste généralement à choisir un coût correspondant au meilleur compromis entre performance et dépense, tout en respectant le niveau minimum acceptable.

□ **Fondamental : Les types de système en IS**

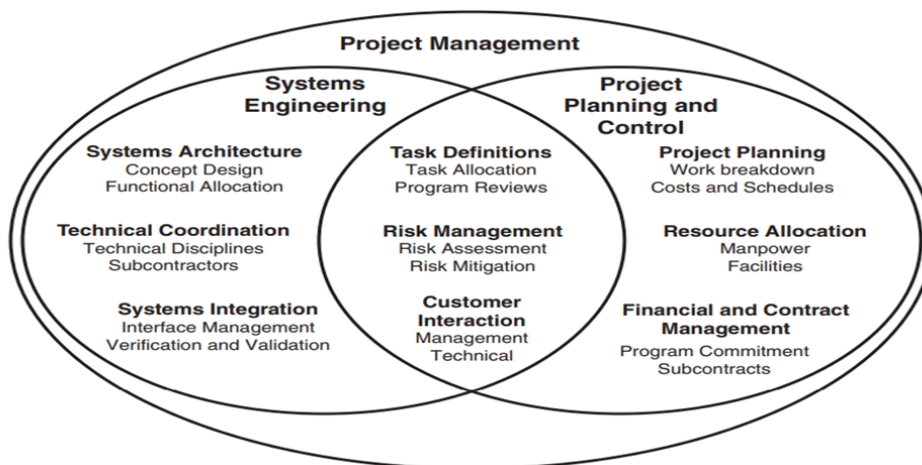
Système à faire (système étudié) :

- A dominante technologique.
- Ensemble organisé de matériels, logiciels, compétences humaines et processus pour répondre à un besoin donné.

Système pour faire (Projet)

- A dominante organisationnelle.
- Ensemble coordonnée d'équipes (multiplicité de compétences, disciplines et métiers), de méthodes, de processus et de moyens pour répondre à un objectif (ici le besoin de développer un système, de le déployer, de le faire évoluer), mobilisé dans un environnement industriel donnée.
- Un programme est un ensemble coordonné de projets

□ **Complément : Système / Projet**



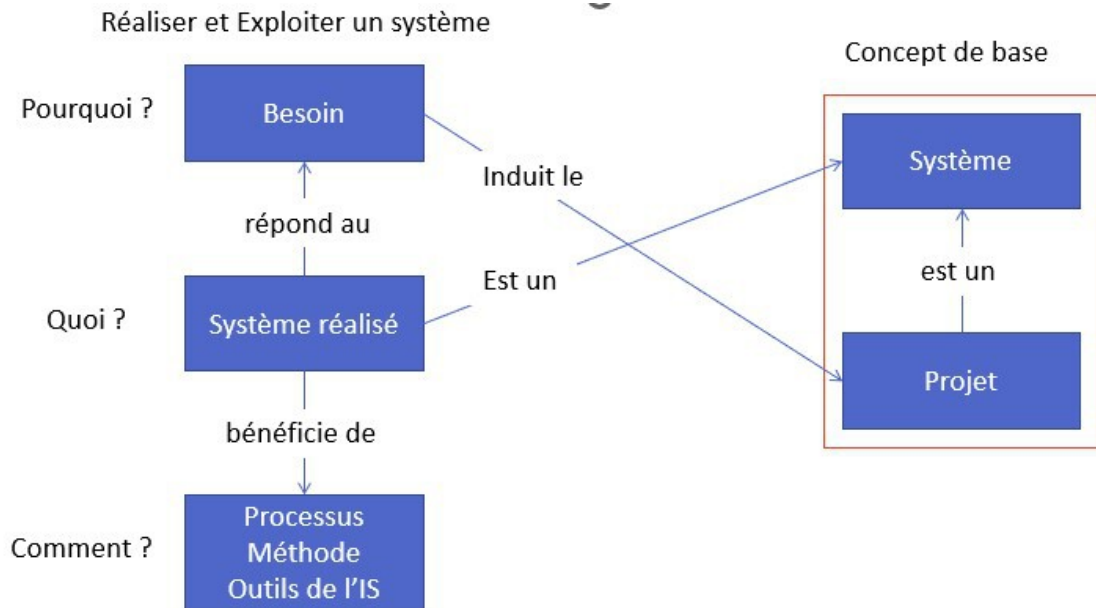
Ce schéma représente la relation entre **l'ingénierie des systèmes (Systems Engineering)** et **la gestion de projet (Project Management)**, en montrant leurs rôles spécifiques ainsi que leurs zones de collaboration.

L'ingénierie des systèmes se concentre principalement sur les aspects techniques du projet. Elle inclut l'architecture du système (conception conceptuelle et allocation fonctionnelle), la coordination technique entre les différentes disciplines et sous-traitants, ainsi que l'intégration du système, notamment la gestion des interfaces, la vérification et la validation. Son objectif principal est de garantir que le système développé répond correctement aux exigences techniques.

La gestion de projet, quant à elle, est orientée vers l'organisation et le pilotage global du projet. Elle comprend la planification du projet (décomposition du travail, coûts et délais), l'allocation des ressources (personnel, infrastructures) ainsi que la gestion financière et contractuelle. Son rôle est d'assurer que le projet est réalisé dans les délais, dans le budget prévu et selon les engagements contractuels.

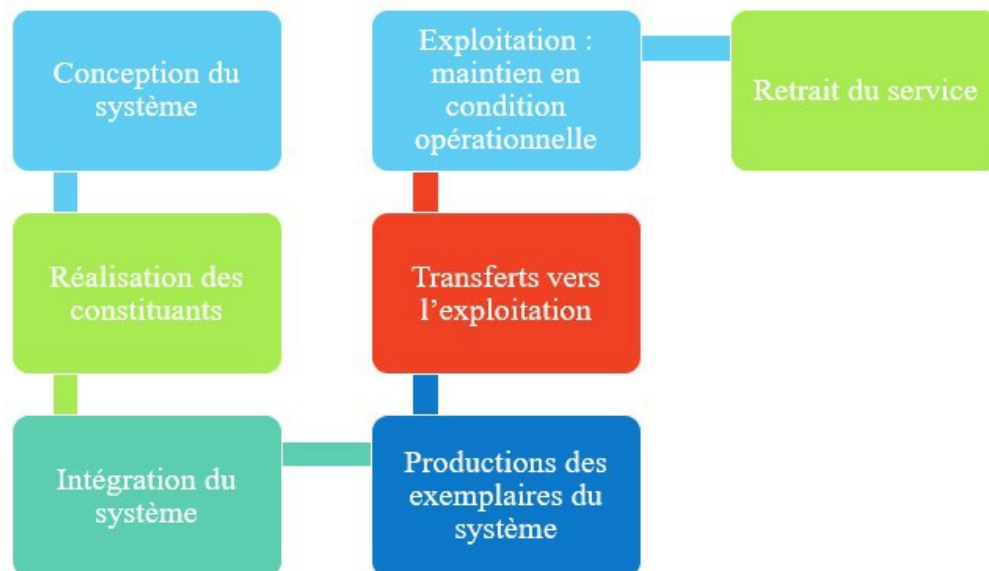
La zone d'intersection entre les deux domaines montre les activités communes ou fortement coordonnées, telles que la définition et l'allocation des tâches, la gestion des risques (évaluation et mitigation) et l'interaction avec le client. Cela illustre que la réussite d'un projet repose sur une collaboration étroite entre la maîtrise technique (ingénierie des systèmes) et le pilotage organisationnel et financier (gestion de projet).

□ **Fondamental : Système / Projet / Programme**



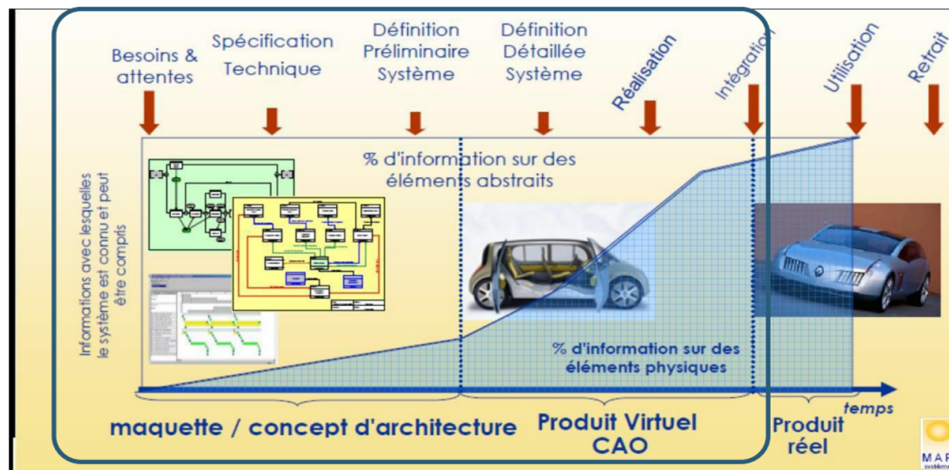
La relation entre le **besoin**, le **système réalisé** et le **projet** répond à trois questions principales : *Pourquoi ?* (le besoin), *Quoi ?* (le système réalisé) et *Comment ?* (les processus, méthodes et outils de l'ingénierie système). Le besoin induit la création d'un projet, qui permet de développer un système. Le système réalisé répond au besoin initial. Ainsi, le projet est le cadre organisationnel permettant de produire le système, en utilisant des processus et des méthodes adaptés.

□ **Fondamental : Cycle de vie d'un système**



Le cycle de vie d'un système, commence depuis sa **conception** jusqu'au **retrait du service**. Le processus commence par la conception du système, suivie de la réalisation des constituants (développement des différents composants). Ensuite vient l'intégration du système, où les éléments sont assemblés pour former un ensemble cohérent. Après cela, on passe à la production des exemplaires du système, puis au transfert vers l'exploitation. Le système entre alors en phase d'exploitation et de maintien en condition opérationnelle, avant d'atteindre finalement la phase de retrait du service. Ce schéma montre donc les différentes étapes successives de réalisation et de gestion du cycle de vie d'un système.

□ Exemple :



La figure représente le **processus de développement d'un système ou d'un produit** tout au long de son cycle de vie, depuis l'identification des besoins jusqu'au retrait du produit après son utilisation. Elle met en évidence l'évolution progressive du système dans le temps ainsi que le passage d'une représentation abstraite vers une réalisation physique concrète.

Le processus débute par la phase des **besoins et attentes**, durant laquelle les exigences des utilisateurs et les objectifs du système sont identifiés et analysés. Ces besoins sont ensuite traduits en **spécifications techniques**, permettant de définir de manière précise les fonctions, les performances et les contraintes que le système doit respecter. À partir de ces spécifications, une **définition préliminaire du système** est élaborée afin de proposer une première architecture globale décrivant les principaux composants et leurs interactions.

La phase suivante correspond à la **définition détaillée du système**, où chaque composant est conçu avec précision à travers des modèles, des schémas et des simulations. Durant ces étapes initiales, le système reste principalement sous forme de **maquette ou de concept d'architecture**, caractérisé par une forte proportion d'informations abstraites. Progressivement, le développement évolue vers la **réalisation**, où les éléments conçus sont fabriqués ou implémentés, puis vers l'**intégration**, phase durant laquelle les différents composants sont assemblés pour former un système complet.

Le système devient alors un **produit virtuel**, généralement modélisé à l'aide d'outils de conception assistée par ordinateur (CAO), avant de se transformer en **produit réel** prêt à être exploité. La phase d'**utilisation** correspond à l'exploitation opérationnelle du produit dans son environnement réel. Enfin, le cycle se termine par la phase de **retrait**, marquant la fin de vie du système.

Ainsi, cette figure illustre que, au fur et à mesure de l'avancement du projet, les informations abstraites diminuent tandis que les informations relatives aux éléments physiques augmentent, traduisant le passage progressif de la conception théorique vers la matérialisation du système réel.

□ Définition : Les systèmes contributeurs

C'est un élément ou un composant intégré dans un système plus large qui apporte une contribution ou une fonction spécifique au sein de ce système global.

• Le système a besoin de :

- Système de conception.
- Système de développement.
- Système de réalisation/production.
- Système pour l'exploitation.
- Système de maintenance.

- Système de retrait.

Un système, tout au long de son cycle de vie, nécessite la mise en place de plusieurs sous-systèmes complémentaires permettant d'assurer sa conception, son fonctionnement et sa gestion jusqu'à sa fin de vie. Ces différents systèmes interviennent de manière successive et coordonnée afin de garantir la performance et la pérennité du système global.

Le **système de conception** constitue la première étape du cycle de vie. Il a pour objectif de définir l'architecture du système en fonction des besoins exprimés. Cette phase comprend l'analyse des exigences, la modélisation, l'élaboration des solutions techniques ainsi que la réalisation de maquettes ou de prototypes conceptuels. Elle permet de transformer une idée ou un besoin en une solution structurée et réalisable.

Le **système de développement** intervient ensuite pour transformer les concepts définis lors de la conception en éléments techniques détaillés. Il englobe les activités de conception détaillée, de programmation, de simulation, de tests et de validation des composants. Cette étape vise à vérifier que les solutions proposées répondent correctement aux exigences initiales avant leur mise en production.

Le **système de réalisation ou de production** correspond à la phase de fabrication ou d'implémentation du système. Les différents composants sont produits, assemblés et intégrés afin de constituer le système complet. Cette phase inclut également les contrôles de qualité et les essais nécessaires pour garantir la conformité du produit final.

Le **système d'exploitation** concerne l'utilisation opérationnelle du système dans son environnement réel. Il assure le fonctionnement quotidien, la gestion des ressources, la supervision des performances et la satisfaction des besoins des utilisateurs. Cette étape représente généralement la période la plus longue du cycle de vie du système.

Le **système de maintenance** permet de maintenir le système en condition de fonctionnement optimal durant son exploitation. Il comprend les actions de correction des défaillances, les mises à jour, les améliorations et les adaptations nécessaires face à l'évolution des besoins ou des technologies. La maintenance contribue à prolonger la durée de vie du système et à garantir sa fiabilité.

Enfin, le **système de retrait** intervient lorsque le système atteint la fin de son cycle de vie. Cette phase consiste à arrêter son utilisation, démanteler les composants, recycler les équipements ou remplacer le système par une nouvelle solution. Elle vise à assurer une transition sécurisée tout en limitant les impacts économiques et environnementaux.

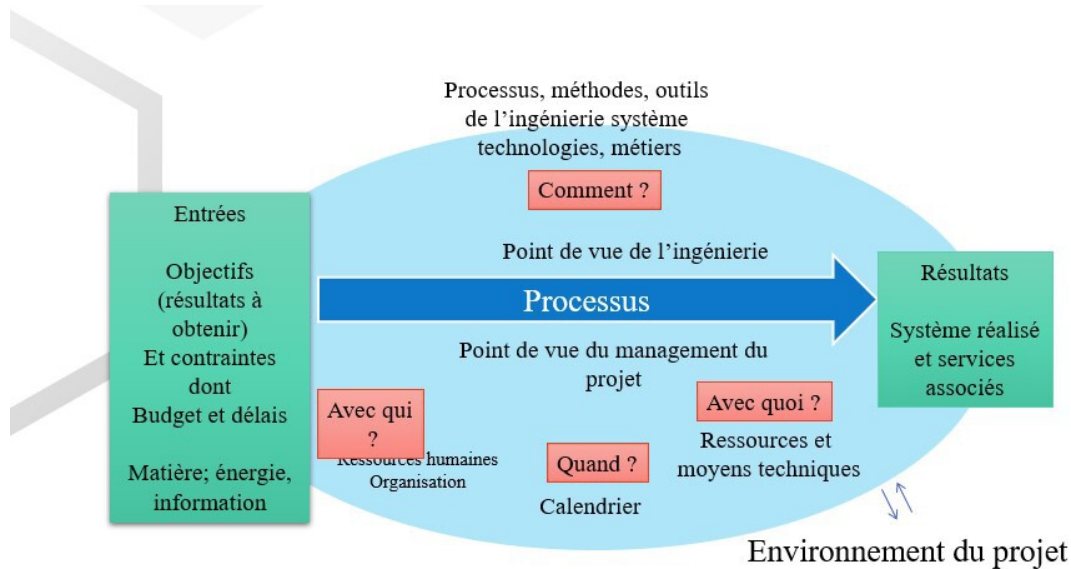
Ainsi, ces différents systèmes assurent une gestion complète du cycle de vie, depuis l'idée initiale jusqu'au retrait définitif du système.

□ Définition : Les parties prenantes du système

Personne physique ou morale concernées directement ou indirectement par le système.

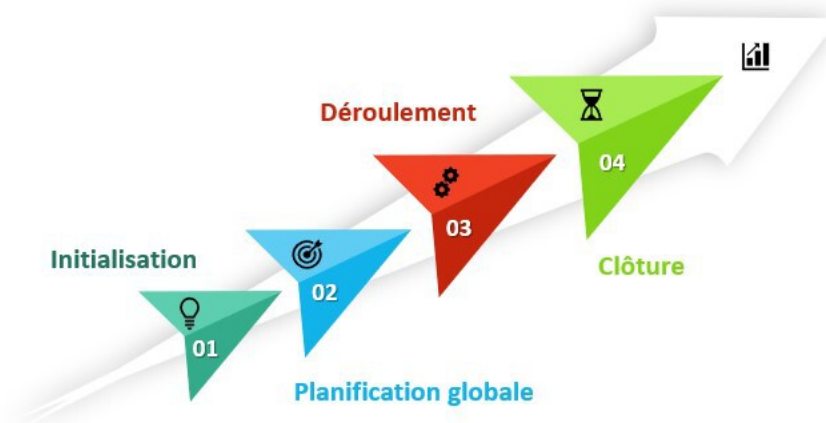
1. Parties prenantes intéressées par l'utilisation.
 - Organisme acquéreur, utilisateur et exploitant.
2. Parties prenantes impliquées dans la réalisation.
 - Concepteurs, développeurs, producteurs, ..
3. Parties prenantes potentiellement concernées.
 - Organisme de normalisation, de règlement, de défense.
 - ONG écologie, syndicats, associations, ...
 - Eventuellement des organismes de certifications.

□ **Fondamental : Le processus du projet (Système pour faire)**



Cette image met en évidence le rôle du **processus** dans un projet d'ingénierie système. À gauche, on trouve les entrées : objectifs, contraintes, budget, délais et ressources (matière, énergie, information). Au centre, le processus est influencé par les méthodes, outils et technologies, et il est analysé selon deux points de vue : celui de l'ingénierie (comment ?) et celui du management de projet (avec qui ?, avec quoi ?, quand ?). À droite, on obtient les résultats, c'est-à-dire le système réalisé et les services associés. L'ensemble évolue dans un environnement de projet, montrant que le processus transforme des entrées en résultats en tenant compte des ressources et des contraintes.

□ **Fondamental : Cycle de vie d'un projet (Système pour faire)**



Il y a **quatre phases principales du cycle de vie d'un projet**. La première phase est l'**initialisation**, où l'on définit l'idée du projet, ses objectifs et sa faisabilité. Ensuite vient la **planification globale**, durant laquelle on établit le planning, le budget, les ressources et les risques. La troisième phase est le **déroulement** (ou exécution), où les activités prévues sont réalisées afin de produire les livrables. Enfin, la **clôture** marque la fin du projet : on valide les résultats, on livre le produit final, on évalue la performance et on capitalise l'expérience acquise. Ce schéma montre donc la progression logique d'un projet, de son lancement jusqu'à sa finalisation.

Glossaire

Holistique

Considérer le système dans sa globalité, comme un tout, et pas seulement ses parties séparées.

Méthodologique

Basé sur une méthode claire, organisée, structurée.

Systematique

Fait de manière organisée, répétable et rigoureuse.

Abréviations

IS :

Ingénierie des Systèmes

Références

- 1 NASA. (1995). Systems Engineering Handbook (NASA-SP-610S)

Bibliographie

- [1] https://theses.hal.science/tel-00468915/file/These_Verries_final.pdf
- [2] Blanchard, B. S., & Fabrycky, W. J. (2011). Systems Engineering and Analysis (5th ed.). Pearson Education.
- [3] INCOSE (2015). Systems Engineering Handbook: A Guide for System Life Cycle Processes and Activities (4th ed.). Hoboken, NJ: Wiley.