Loïc Pineau
Julie Stal-Le Cardinal
Ludovic-Alexandre Vidal

Génie industriel

Les fondamentaux

ellipses

Chapitre 1 – Introduction au génie industriel

Introduction

Bienvenue dans le monde fascinant du génie industriel, une discipline à la croisée des chemins entre ingénierie, management et optimisation des systèmes. Ce livre, spécialement conçu pour refléter l'enseignement dispensé à CentraleSupélec, vous emmène dans un voyage au cœur des méthodes, des outils et des philosophies qui façonnent cette science dynamique et essentielle. À travers ses pages, vous découvrirez comment cette discipline permet de transformer les défis industriels en opportunités innovantes et durables.

1. Les fondements du génie industriel à CentraleSupélec

L'École Centrale Paris, souvent simplement appelée Centrale, a été fondée en 1829 par Alphonse Lavallée, un homme d'affaires et philanthrope français. Toutefois, une figure intellectuelle importante a également influencé la création de cette institution : Claude Henri de Rouvroy, comte de Saint-Simon. Saint-Simon, penseur social et économiste, est reconnu pour ses idées progressistes sur l'industrialisation et le rôle des ingénieurs dans la société. Selon lui, le progrès social et économique devait être guidé par ceux qui possédaient les connaissances techniques et scientifiques nécessaires pour moderniser la production et améliorer les conditions de vie. La création de l'École Centrale visait à réaliser cette vision en formant des ingénieurs polyvalents capables de répondre aux besoins de l'industrie en plein essor au XIX^{e} siècle, « former les médecins des usines et des fabriques ».

L'École Supérieure d'Électricité, connue sous le nom de Supélec, a été fondée en 1894 pour répondre à un autre besoin émergent : la formation d'ingénieurs spécialisés dans le domaine de l'électricité. L'électricité devenait une nouvelle force motrice pour l'industrie, et il était crucial de former des ingénieurs aptes à maîtriser et à développer ces nouvelles technologies. Supélec a été créée par Eleuthère Mascart, un éminent physicien et ingénieur, avec le soutien de l'État français et des entreprises industrielles. L'école s'est concentrée sur l'enseignement des principes fondamentaux de l'électricité, de l'électromagnétisme et de leurs applications pratiques dans l'industrie. Supélec a rapidement établi une réputation d'excellence grâce à son approche rigoureuse et innovante de l'éducation.

CentraleSupélec, issue de la fusion de ces deux prestigieuses institutions françaises est reconnue pour son excellence académique et son approche novatrice de l'ingénierie. Cette fusion a permis de combiner le meilleur des deux mondes : la rigueur scientifique et technique de Supélec avec l'approche généraliste et

polyvalente de l'École Centrale. Ancrée dans une tradition d'excellence, CentraleSupélec forme des ingénieurs capables de relever les défis complexes du monde industriel moderne grâce à une formation qui allie théorie avancée et pratique appliquée.

Le génie industriel est une discipline enseignée à CentraleSupélec et c'est aussi la principale thématique de recherche d'un laboratoire du même nom. Certains concepts ou certaines méthodes présentées dans ce livre sont basés sur des recherches développées dans le cadre de thèses de doctorat avec nos chercheurs et d'autres sont issus de la littérature. Toutes les références se trouvent à la fin de l'ouvrage, indexées par chapitre.

Le génie industriel ne se contente pas de former des ingénieurs spécialisés dans la production ou la gestion des opérations. Il vise à développer une vision holistique et stratégique des systèmes industriels. Cette vision englobe des compétences en optimisation, en gestion de projets, en analyse des données et en innovation. Une telle approche multidisciplinaire est essentielle pour concevoir, améliorer et gérer les processus et les systèmes de production de manière efficace et durable.

2. Les objectifs de ce livre

C'est à partir de l'expérience d'enseignement du génie industriel que nous avons mise en place et que nous dispensons depuis plus de vingt ans à Centrale, puis à CentraleSupélec, et des travaux de recherche du laboratoire de génie industriel de l'école, que nous avons écrit cet ouvrage de synthèse à propos de cette discipline. Ce livre s'adresse à ceux qui souhaitent comprendre les principes fondamentaux et les applications pratiques du génie industriel. Qu'il s'agisse d'étudiants, de professionnels ou de chercheurs, chacun y trouvera des perspectives enrichissantes et des outils méthodologiques pour aborder les problèmes complexes de l'industrie d'aujourd'hui et de demain.

Notre objectif est de fournir une compréhension approfondie des concepts clés tout en offrant des exemples concrets de leur application.

Pour enrichir l'expérience d'apprentissage et garantir une compréhension approfondie des concepts abordés, chaque chapitre de ce livre est accompagné d'études de cas et/ou d'exercices pratiques.

3. Les études de cas : des applications réelles

Les études de cas, inspirées de situations réelles rencontrées dans diverses industries, permettent de contextualiser les théories et les méthodes présentées. Elles offrent une perspective concrète sur la manière dont les principes du génie industriel peuvent être appliqués pour résoudre des problèmes complexes et optimiser les performances des systèmes. Par exemple, nous examinons comment un grand groupe industriel français optimise la gestion des transports pour réduire ses émissions de CO_2.

Ces études de cas ne se contentent pas de décrire des situations. Elles incluent également des discussions sur les défis rencontrés, les décisions prises et les résultats obtenus. De cette manière, le lecteur peut comprendre non seulement ce qui a été fait, mais aussi pourquoi certaines approches ont été choisies et comment elles ont été mises en œuvre. Chaque étude de cas encourage le lecteur à réfléchir de manière critique aux solutions présentées et à envisager des alternatives possibles.

4. Les exercices pratiques : renforcer les compétences

Les exercices pratiques, quant à eux, sont conçus pour renforcer l'assimilation des connaissances et développer les compétences analytiques et techniques des lecteurs. Ils couvrent une large gamme de scénarios, des problèmes simples aux défis plus élaborés, exigeant une réflexion critique et une application créative des concepts appris. Les solutions détaillées fournies permettent aux lecteurs de vérifier leur compréhension et de consolider leur apprentissage.

Certains exercices demandent de résoudre des problèmes mathématiques ou de modélisation, tandis que d'autres exigent une analyse qualitative ou une prise de décision stratégique. Par exemple, après avoir appris les principes de l'optimisation linéaire, le lecteur peut travailler sur des problèmes qui impliquent l'optimisation des ressources dans une usine de production. De même, après une introduction aux techniques de gestion de la chaîne d'approvisionnement, des exercices peuvent inclure la conception d'un réseau logistique pour une entreprise internationale.

5. Les concepts clés et thèmes abordés

Au fil des chapitres, nous explorons des concepts clés tels que la modélisation des systèmes, l'analyse des performances, la gestion de la chaîne d'approvisionnement, l'optimisation des processus, et l'innovation technologique. Chaque thème est traité de manière exhaustive, avec des explications claires et détaillées accompagnées d'exemples concrets et de graphiques explicatifs pour illustrer les idées présentées. Ainsi, lorsque nous abordons la modélisation des systèmes, nous discutons des différentes méthodes de modélisation, telles que les modèles mathématiques, les simulations par ordinateur et les modèles stochastiques. Chaque méthode est illustrée par des exemples pratiques tirés de diverses industries.

En ce qui concerne l'analyse des performances, nous examinons comment mesurer et évaluer l'efficacité et l'efficience des systèmes de production. Nous discutons des indicateurs de performance clés (*KPI*) et de la manière dont ils peuvent être utilisés pour identifier les goulots d'étranglement et les opportunités d'amélioration.

La gestion de la chaîne d'approvisionnement est également un thème central. Nous analysons les défis complexes de la gestion des flux de matériaux à travers des réseaux logistiques globaux. Des outils tels les systèmes de gestion de la chaîne d'approvisionnement (SCM) sont explorés. Ce qui est présenté ici sur les matériaux

et la logistique pourra être appliqué de façon similaire aux flux d'information et à la planification des ressources de l'entreprise (ERP).

L'optimisation des processus est un autre pilier du génie industriel. Nous présentons les techniques d'optimisation. Chaque technique est expliquée en détail, avec des exemples d'application dans des contextes industriels tels que la planification de la production, la gestion des stocks, et l'ordonnancement des tâches.

Enfin, la créativité et l'innovation au sens large sont abordées dans les premiers chapitres. Nous avons pris le parti de ne pas traiter en particulier l'innovation technologique en tant que moteur de la transformation industrielle. Nous n'aborderons donc pas les enjeux actuels autour des technologies émergentes, telles que l'Internet des objets (ou *Internet of Things*), l'Intelligence Artificielle (IA), et la fabrication additive (impression 3D).

6. Une approche multidisciplinaire et collaborative

Le génie industriel à CentraleSupélec est caractérisé par une approche multidisciplinaire et collaborative. Les étudiants sont encouragés à travailler en équipes sur des projets réels, souvent en partenariat avec des entreprises industrielles. Cette collaboration permet aux étudiants de mettre en pratique les concepts appris en classe et de développer des compétences en communication, en gestion de projet et en leadership.

Certains des cas présentés ici pourraient être traités en projets collaboratifs pour être réalisés en groupe, permettant aux lecteurs de simuler l'expérience de travail en équipe sur des problèmes industriels réels.

7. Préparer les ingénieurs de demain

L'objectif ultime de ce livre est de préparer les ingénieurs de demain à devenir des leaders dans l'industrie. En combinant une solide formation théorique avec une multitude d'exemples pratiques et d'exercices, nous espérons fournir aux lecteurs les outils nécessaires pour exceller dans leur carrière. Le génie industriel est une discipline dynamique et en constante évolution, et il est crucial que les futurs ingénieurs soient prêts à s'adapter aux nouvelles technologies et aux défis émergents.

En parcourant ce livre, vous découvrirez comment les principes du génie industriel peuvent transformer les défis en opportunités et les idées en réalité. Que vous soyez étudiant en génie industriel, professionnel en activité, ou simplement intéressé par le domaine, nous espérons que vous trouverez ce livre à la fois instructif et inspirant. Nous vous invitons à plonger dans les chapitres suivants, à explorer les concepts, à résoudre les exercices, et à vous immerger dans les études de cas. À travers cette exploration, vous développerez une compréhension profonde et pratique du génie industriel, prête à être appliquée dans le monde réel.

Cet ouvrage est forcément ancré dans le temps et utilise le savoir et les connaissances disponibles aujourd'hui. En revanche, la pédagogie et la philosophie qui le soutiennent traversent les âges et doivent permettre à chacun de s'adapter et d'adopter des technologies nouvelles avec les méthodes de résolution que nous proposons. Outils et méthodes ne sont que des aides à la résolution de problèmes : à vous de discerner et d'être capable de les utiliser au bon moment, et de les extrapoler à vos besoins.

I. Principes généraux

1. Définition

Selon l'*American Institute of Industrial Engineers*, le *génie industriel* « englobe la conception, l'amélioration et l'installation de systèmes intégrés d'hommes, de matériaux, d'équipements et d'énergie. Il utilise les connaissances des sciences mathématiques, physiques et sociales ainsi que les principes et méthodes de conception, d'analyse propres au génie, dans le but de spécifier, prédire et évaluer les résultats découlant de ces systèmes ».

Par ailleurs, selon le *Handbook of Industrial Engineers*, il « vise l'amélioration continue de la productivité, de l'efficacité et des contrôles de la performance. Ses sciences s'intéressent donc à la conception, à l'implantation, à l'amélioration et à l'opération des systèmes intégrés de ressources humaines, matérielles, d'équipements et d'énergie ».

2. Cycle de vie

D'une manière générale, le génie industriel s'intéresse aux systèmes de production, d'approvisionnement et de distribution de biens ou de services, à leur conception, à leur mise en œuvre, à leur gestion, à leur maintenance, et à leur amélioration, avec une vision systémique. C'est donc la science de l'optimisation des performances globales de l'entreprise.

Ainsi, les sciences du génie industriel visent à piloter et coordonner chacune des étapes du *cycle de vie* d'un produit ou service (cf. *figure 1.1.)*

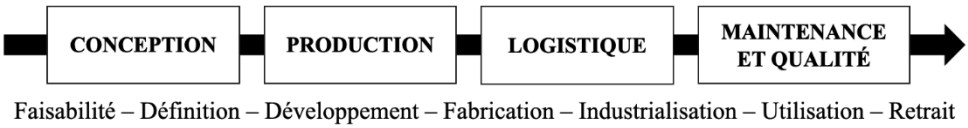

Figure 1.1. – Génie industriel et cycle de vie d'un produit ou service

II. Métiers et compétences

L'ingénieur en génie industriel trouve des débouchés dans tous les secteurs producteurs de biens ou de services. Il peut s'intégrer dans toute taille d'entreprise ou d'organisation : PME-PMI, grands groupes industriels, sociétés de conseil, grandes organisations publiques ou internationales. Il pourra par exemple exercer les fonctions suivantes :

- responsable de production d'une usine de production automobile ;
- responsable de l'organisation de la logistique d'un hôpital ;
- consultant en organisation au sein d'un cabinet de conseil ;
- membre d'une équipe de conception de nouveaux produits de maroquinerie ;
- responsable de la réduction des temps d'attente dans un parc d'attractions ;
- organisation du plan de maintenance d'équipements ferroviaires ;
- responsable de production d'événements artistiques…

Parmi les missions de l'ingénieur ingénieur, on peut également citer les suivantes :

- concevoir des méthodes de conception et des nouveaux produits ou services ;
- concevoir des méthodes de production ;
- mettre en œuvre et anticiper les actions nécessaires pour optimiser l'utilisation des moyens de production ;
- implémenter les systèmes d'information nécessaires à l'entreprise ;
- organiser le circuit de production et la logistique associée ;
- participer à l'évolution des produits ;
- manager des équipes projets ;
- organiser la fonction maintenance de l'entreprise pour limiter les coûts…

Pour chacune de ces missions, des compétences spécifiques sont requises. Ce livre a été pensé et conçu pour permettre à chacun de maîtriser certaines des compétences fondamentales liées à ces missions.

À noter : ce livre est une synthèse libre, d'après la sensibilité de ses auteurs, de différentes méthodes et outils afin, pour chaque chapitre, d'en retenir l'essentiel et le plus facile et optimal à mettre en avant.

Chapitre 2 – Approche systémique

Introduction

Par Karim TAZAROURTE

Professeur des Universités-Praticien Hospitalier,
SAMU 69, Service d'Urgence du CHU Edouard Herriot Lyon

La médecine d'urgence en France, comme dans tous les pays économiquement développés, est un marqueur fort pour analyser un système de santé et le service rendu aux patients. C'est une spécialité qui gère des flux de patients et des processus complexes d'accueil, d'information, de décision, d'exécution de la décision et de suivi, tout ceci en contrainte temporelle, territoriale, interdisciplinaire et réglementaire. Laissez-moi vous décrire en quelques lignes ce qu'est la fonction d'une structure d'urgence et le lecteur comprendra tout de suite l'importance du chapitre à suivre consacré à l'approche systémique.

La mission d'un Service (ou Structure) d'Urgence (SU) est d'accueillir, d'évaluer et de prendre en charge toute situation aiguë à caractère médical ou chirurgical d'une personne qui s'y présente, spontanément ou adressée par un professionnel de santé, qu'elle s'y rende par ses propres moyens ou par l'intermédiaire d'un vecteur sanitaire (ambulance) ou de secours sapeur-pompier (VSAV).

Cette arrivée peut se faire directement, sans annonce préalable, ou après avis de la régulation médicale du Service d'Aide Médicale Urgente (SAMU), accessible directement par le numéro 15 ou bien après transfert via le numéro 18-112 (pompiers) ou plus rarement 17 (police). La régulation médicale du SAMU, premier maillon de la chaîne de secours, a pour but de déterminer et de déclencher dans les meilleurs délais la réponse la plus adaptée à chaque situation.

Lors du premier contact téléphonique avec l'appelant en cas d'appel au 15, les Assistants de Régulation Médicale (ARM) évaluent la gravité et l'urgence de l'appel par un interrogatoire minuté, trient l'appel urgent réel de celui ressenti et transmettent l'appel au médecin régulateur urgentiste ou généraliste.

Le choix par le médecin régulateur de la réponse la mieux adaptée se fonde sur trois critères : l'estimation du degré de gravité avérée ou potentielle, l'appréciation du contexte, l'état et les délais d'intervention des ressources disponibles. Le SAMU oriente ensuite le patient vers la structure adéquate, prépare et annonce cette arrivée.

Au sein des SU, l'organisation de la gestion du flux est primordiale et repose sur plusieurs principes : le triage infirmier à l'accueil et la gradation de la prise en

charge en aval du tri ; la mise en place d'une filière rapide de prise en charge ; l'adaptation des effectifs au flux ; l'adéquation de la démarche diagnostique au sein du SU, avec une demande raisonnée et maitrisée des examens complémentaires – biologiques et radiologiques – et des avis spécialisés.

La polyvalence demandée au SU est telle qu'il doit, entre autres, disposer d'une Salle d'Accueil des Urgences Vitales (SAUV) pour la prise en charge des patients les plus graves, d'une Unité d'Hospitalisation de Très Courte Durée (UHTCD), d'une salle de décontamination chimique et radiologique, de locaux d'accueil pour afflux massifs de victimes.

Le SU est le premier maillon organisationnel des plans de secours hospitaliers de type « plan blanc ». Il est le pivot de l'hôpital et ses médecins sont à l'interface de toutes les spécialités comme premier échelon d'une chaîne médicale de prise en charge avec la nécessité de s'entourer des compétences médicales nécessaires et disponibles pour optimiser la prise en charge des patients.

Une des grandes richesses du SU est d'être un lieu de convergence de compétences médicales. Une de ses grandes difficultés est de devoir organiser un parcours multi-acteurs au profit des patients, et cela dans un laps de temps contraint doublé des exigences de patients parfois décorrélées de leurs besoins médicaux. Le fonctionnement harmonieux d'un SU ne peut se concevoir que de manière intégrée à l'ensemble de la structure hospitalière qui l'héberge, en particulier pour la gestion des lits d'hospitalisation. De ces missions découle la nécessaire polyvalence tant en matière de soins qu'en matière d'organisation des soignants des SU.

Depuis vingt ans, l'activité des SAMU a augmenté massivement (en 2022, 23 millions d'appels reçus). Les flux de patients admis en SU sont difficilement contrôlables et ne cessent de progresser, en moyenne de 4 % par an en France depuis 1996. Le recours croissant aux SU est constaté également dans tous les pays développés.

L'augmentation du recours aux SU est multifactorielle : accessibilité 24/7 à ce service sans avance de frais, effondrement de l'offre de soins en médecine générale aux horaires de la permanence des soins ambulatoire ou encore difficultés d'hospitalisation directe depuis la ville par les médecins généralistes ou spécialistes. Ainsi, les SU représentent une part croissante des admissions hospitalières, jouant le rôle de porte d'entrée principale des hospitalisations.

Cette progression du flux entrant conduit à une saturation des SU (*overcrowding*), particulièrement en période hivernale, combinée à un personnel soignant souvent en sous-effectif. Cette suractivité est délétère pour les patients et les soignants (Douplat M et al., 2022 ; Roussel M et al., 2023). De fait, les urgences sont devenues une préoccupation importante des politiques, médias, administrateurs et experts de l'organisation de la santé.

Nous avons là un modèle parfait pour l'approche systémique. Jusqu'ici de nombreuses décisions ne se sont basées que sur une approche analytique