

## Préface de Laurent Baseilhac

Sans aucun doute, nous sommes entrés dans une nouvelle ère. Le changement à venir paraît si important qu'on parle déjà de révolution numérique. Dans ce contexte surgissent de nombreuses questions :

– quel avenir pour l'industrie de procédé, mais également pour les femmes et les hommes talentueux qui en sont les artisans ?

– allons-nous perdre ce niveau d'excellence bien français dans le domaine ? Ou bien, au contraire, le cultiver en ravivant les vocations métier à l'aune des challenges que nous percevons aujourd'hui ?

– le pari du numérique est-il un pari gagnant ?

– comment les industries se préparent-elles à leur transformation numérique ? Où en sont les risques ?

Autant de nouveaux défis qui suscitent la réflexion...

Jean-Pierre Dal Pont, Marie Debaq et leurs co-auteurs s'attachent à retracer quelques trajectoires industrielles montrant que, à différentes époques, les professionnels de l'industrie ont eu la capacité à surmonter les enjeux de leur temps (production, productivité, adaptation aux modes de consommation, etc.). Les enjeux diffèrent aujourd'hui, avec des marqueurs sociétaux et environnementaux de plus en plus prégnants. On comprend, au travers du livre, que les réponses sont à chercher probablement encore une fois du côté des technologies du génie des procédés, mais également dans notre capacité à renouveler nos modèles de management mis en œuvre au niveau industriel.

Les lecteurs partageront, j'en suis sûr, ce sentiment d'urgence à prendre à bras le corps l'ensemble des défis du nouveau monde. En faisant cela, nous cultivons un

terrain d'expression pour nos talents présents et futurs et nous travaillons à la mise en place des conditions d'une possible réindustrialisation.

Mais n'allons pas trop loin, au risque de trahir l'esprit des auteurs qui, à ce stade, cherchent d'abord à provoquer l'éveil des consciences ; ils consentent ensuite à nous livrer quelques clés, mais surtout nous encouragent à ouvrir des chemins au-delà des démarcations étroites que nous traçons souvent par habitude dans nos métiers ; tout cela bien sûr sans renier les fondamentaux qui en constituent le socle.

Chers lecteurs, industriels, universitaires, étudiants et futurs acteurs ou architectes de nos industries de procédé, je vous invite sans plus tarder à plonger dans cet ouvrage plein, bien documenté, agrémenté de témoignages industriels de qualité où transpire la passion inextinguible de leurs auteurs référents pour la chose de l'industrie.

Une façon de ne plus douter du sens de notre métier, une formidable bouffée d'énergie pour écrire l'histoire industrielle de notre prochaine décennie.

Laurent BASEILHAC  
Directeur des procédés chez Arkema  
Responsable Digital Manufacturing

## Préface de Vincent Laflèche

Quand Jean-Pierre Dal Pont m'a proposé de rédiger la préface de son ouvrage, j'ai accepté avec enthousiasme.

Pas simplement par amitié. Nous nous connaissons et avons l'occasion de collaborer depuis plus de quinze ans. Nous partageons la même conviction de l'importance de renforcer les liens et les échanges entre les industriels et les chercheurs et enseignant chercheurs, entre la recherche privée, la recherche académique et l'enseignement supérieur.

En tant que directeur général adjoint puis directeur général de l'INERIS (Institut national de l'environnement industriel et des risques), puis président du BRGM (Bureau de recherches géologiques et minières) et depuis 2016 directeur de l'École des mines de Paris, j'ai placé le développement de la recherche partenariale avec les entreprises au cœur de ma stratégie, en veillant à ce que notre activité de recherche en amont, financée par des subventions publiques, vienne en permanence irriguer l'excellence scientifique de nos équipes.

L'École des mines de Paris a adopté en 2017 son plan stratégique. Membre composant de la nouvelle université PSL (Université Paris sciences et lettres, qui se place d'emblée dans le top 50 des meilleures universités mondiales et première université française), l'école forme scientifiques et ingénieurs au plus proche d'une activité de recherche. Plus de 75 % de l'activité de l'école est dédiée à la recherche et environ 25 % seulement à l'enseignement. Son ambition est de former des ingénieurs généralistes capables d'apporter une contribution significative pour relever les grands défis du XXI<sup>e</sup> siècle. La transformation écologique, avec un focus particulier sur la transformation énergétique, est clairement un axe stratégique. Le second axe est la transformation numérique des entreprises, avec pour l'école un positionnement résolument de maîtrise d'ouvrage. Tous nos étudiants ingénieurs ont, depuis la rentrée de septembre

2019, des tronc communs dès la première année qui les préparent au traitement massif des données, pour ne pas utiliser des mots qui parfois se démodent assez vite, comme *deep learning* ou intelligence artificielle (IA). Veiller à l'excellence scientifique, en particulier mathématique, de nos élèves ingénieurs reste clairement un marqueur stratégique durable.

L'approche « résolument maîtrise d'ouvrage » signifie que ces outils seront par la suite utilisés dans des projets d'ingénierie, en contact et à l'écoute de projets de partenaires industriels. L'école fait de longue date du Big Data en géoscience pour optimiser les forages, qu'ils soient pétroliers ou en géothermie. L'école a également été distinguée pour l'apport de l'IA dans la détection et le traitement de cancers dans le cadre de travaux avec l'institut Curie, également membre de PSL. L'enjeu n'est pas seulement pour nos diplômés de savoir utiliser ces nouveaux outils, mais aussi de savoir poser et concevoir la question industrielle dans le cadre plus large ouvert par ces nouveaux outils, ce qui impose de bien comprendre la réalité technologique et industrielle.

Nous formons des ingénieurs généralistes. Depuis plus de deux siècles, l'ingénieur des Mines doit en effet intégrer des dimensions scientifiques, économiques et humaines, mais aussi de management, de sécurité, d'ouverture et de solidarité que les débuts de carrière professionnelle « au fond » inculquent inévitablement. La formation de l'école conjugue à cet effet sciences dures ou de l'ingénieurs, sciences naturelles et sciences humaines et sociales (économie, management, sociologie, etc.).

L'ouvrage de Jean-Pierre Dal Pont et Marie Debaq ne pouvait pas mieux épouser la stratégie de l'école, et réciproquement. Les mots « théorie et pratique » sont inscrits au fronton de notre établissement depuis bientôt deux siècles. De la même façon, des cas concrets jalonnent et illustrent cet ouvrage. Ce choix ne peut que ravir le directeur de l'École des mines que je suis. Ces cas concrets portent sur des sujets d'actualité, souvent largement médiatisés (*Smart City*, recyclage des plastiques, etc.). Ce n'est pas dans le seul objectif de suivre l'actualité : c'est la reconnaissance du fait que nous traversons une période où nous avons des cycles d'innovations de plus en plus rapides – tirés en particulier par la révolution du numérique – et que nous avons besoin d'innovation et de nouvelles technologies pour relever les défis d'un développement durable, mais que ces innovations ne sont pas forcément acceptées par le grand public dans notre société qui voit la confiance dans l'ingénieur et l'expert diminuer. L'ingénieur et le scientifique doivent intégrer cette dimension dans leur démarche. Des outils et méthodes développés dans cet ouvrage intègrent parfaitement ces enjeux.

Cet ouvrage fait donc non seulement un lien passionnant entre les enjeux de l'entreprise, de la recherche et l'enseignement supérieur, mais il ouvre plus largement

sur de grands enjeux sociétaux. Il le fait au moment où, alors que les transitions écologique et énergétique sont en cours, la révolution numérique apporte des changements profonds dans la conduite des entreprises et du management industriel. Cette révolution a aussi des conséquences sur la société et apporte son lot de craintes et de fantasmes, comme ceux qu'engendre la robotique. Cet ouvrage arrive à point nommé pour aider les étudiants, les enseignants, les chercheurs, les professionnels dans leurs choix et leurs réflexions concernant un monde en pleine évolution où science et technologie sont de plus en plus les acteurs incontournables d'un développement durable.

Je le recommande vivement !

Vincent LAFLÈCHE  
Directeur de l'École des mines de Paris

---

## Préface de June Wispelwey

---

Il y a quinze ans, en créant la Society for Biological Engineering de l'American Institute of Chemical Engineers (AIChE®), j'ai eu la chance de rencontrer Jean-Pierre Dal Pont. Nous avons parlé de l'avenir de la profession d'ingénieur chimiste et de l'influence des progrès du génie biologique, en particulier de la bioénergie et de la biopharma. Nous avons discuté des possibilités de créer de nouvelles protéines thérapeutiques vitales et de nouveaux produits chimiques fabriqués économiquement à partir de matières premières renouvelables. C'était la première de nombreuses conversations inspirantes que nous allions avoir sur l'avenir du génie chimique. Ce n'est pas une surprise pour moi qu'il ait écrit ce livre passionnant sur les industries de transformation et leur avenir.

C'est maintenant le temps de la transformation. L'AIChE est le témoin de deux phénomènes en ce moment même : l'intensification des processus et la modularisation. Cet effort, mené par le RAPID Manufacturing Institute de l'AIChE, vise à améliorer l'efficacité énergétique, à réduire les besoins d'investissement et à éliminer les obstacles qui ont limité le déploiement de cette technologie. Par exemple, l'intensification des procédés peut combiner des étapes et entraîner une réduction des coûts dans des industries comme celles du pétrole et du gaz, de la pâte à papier et de la production chimique. La modularisation permet d'ajouter de la capacité par petits incréments qui sont mieux adaptés aux besoins des fabricants. L'Institut élimine les risques associés aux nouvelles technologies dans ces industries à forte intensité de capital et réduit l'empreinte écologique.

La numérisation, et l'industrie 4.0 en général, apportent de nouvelles transformations. Il existe de nombreux aspects de la numérisation, y compris l'Internet des objets, la fabrication intelligente, l'impression 3D, la réalité augmentée ou virtuelle, l'intelligence artificielle, les Big Data, la robotique, les drones et plus encore. Ces technologies individuelles sont rendues possibles par la nouvelle vitesse de calcul, bien qu'elles

soient menacées par la cybersécurité. Les ingénieurs chimistes et autres, les techniciens, les opérateurs et tous ceux qui travaillent dans les industries de transformation devront comprendre et utiliser ces technologies à mesure qu'elles évolueront.

Cet ouvrage arrive au bon moment pour la nouvelle génération, qui permettra l'utilisation de ces technologies et en développera de nouvelles pour renforcer les industries de transformation et rendre le monde meilleur.

June WISPELWEY  
Directrice exécutive et PDG d'AIChE

# Introduction

Résultat de la mise en commun de connaissances des mondes académique et industriel, cet ouvrage a pour ambition de faire découvrir aux étudiants, aux enseignants, aux chercheurs, aux professionnels, aux décideurs et de façon générale au grand public, les **industries de procédés** (*process industries*) au moment où elles sont affectées par la **révolution numérique** qui accompagne les transitions énergétique et environnementale en cours.

Ces industries ont pour but de transformer et/ou séparer la matière par voie chimique, physique ou biologique. Elles couvrent des domaines immenses et souvent complexes tels que la chimie, le pétrole, la pharmacie, la cosmétique, la métallurgie, l'agroalimentaire, la biotechnologie, les industries de l'environnement et de l'énergie, etc. Leur importance économique et sociétale est considérable.

Les **entreprises** qui en dépendent créent de la **valeur** par leurs produits issus d'outils industriels (ateliers, usines) qui mettent en œuvre des **technologies** et des **procédés** spécifiques. La science permettant cette mise en œuvre est appelée « génie des procédés » (*chemical engineering*).

Pour mémoire, ce nom est à créditer au regretté professeur Jacques Villermaux de l'École nationale supérieure des industries chimiques (ENSIC) de Nancy, qui fit le constat que l'ensemble des savoirs et des techniques du génie chimique pouvait parfaitement être appliqué, au-delà des industries de la chimie et du pétrole, à toutes les industries de procédé.

Cet ouvrage est une invitation à découvrir le mode de fonctionnement et le management technique et industriel de ces industries. Il tente de répondre succinctement aux questions suivantes :

- qu'est-ce qu'une entreprise ?
- quels sont ses fondements et comment est-elle organisée ?
- comment répond-elle à ce que l'on nomme aujourd'hui la RSE (responsabilité sociétale des entreprises) ?
- comment coopère-t-elle avec ses parties prenantes (*stakeholders*) (clients, employés, administration, etc.) alors que naît le concept d'un capitalisme à visage humain qui, en plus de rémunérer ses actionnaires, veut afficher sa contribution au bien commun ?
- comment conçoit-elle ses produits commerciaux à partir des résultats de ses recherches ?
- comment construit-elle et manage-t-elle ses ateliers et usines pour fabriquer et distribuer ses produits après en avoir évalué l'impact sur l'environnement par une analyse écoconception basée sur l'ACV (analyse du cycle de vie) ?
- quelles sont les bases scientifiques et les « briques technologiques » que l'ingénieur de procédé, au cœur du dispositif, va utiliser pour concevoir et faire fonctionner le **procédé de fabrication** ?

Afin d'assurer leur pérennité, les entreprises de procédés doivent s'adapter à leur environnement socio-économique, et plus particulièrement à la société qu'elles façonnent par leurs innovations et leurs produits. Elles peuvent notamment contribuer à répondre aux grands défis du monde actuel comme celui de l'accroissement démographique : si l'on en croit les prévisions, il y aura deux milliards de personnes supplémentaires à nourrir en 2050. L'urbanisation croissante va également créer des problèmes vite insurmontables s'ils ne sont pas gérés dès à présent : une ville comme Chongqing sur les bords du Yang Tsé a une population qui représente la moitié de la population française. Les notions de *Smart City* et de *Smart Building* s'imposent dès lors. Quant au changement climatique, c'est peut-être le plus grand défi de la planète : le stress hydrique qui lui est associé va affecter 17 pays dont l'Inde. L'eau, c'est la vie !

À cela s'ajoute le fait que le consommateur de plus en plus *éclairé* veut connaître ce qu'il a dans son assiette, être renseigné sur la provenance des produits qu'il utilise. Traçabilité, authentification, naturalité, commerce équitable, etc., sont des notions que l'industriel ne peut plus ignorer. À titre d'exemple, le monde s'inquiète du devenir des plastiques : les « gyres-continentes »<sup>1</sup> qui font plusieurs fois la taille de la France laissent pantois.

---

1. Continents de plastique flottant sur les océans, abritant une faune aquatique qui s'en nourrit et rentre dans la chaîne alimentaire.

Cet ouvrage s'intéresse tout particulièrement à l'outil industriel au centre de l'entreprise. L'avenir de celle-ci va dépendre fortement de sa conception, de sa mise en œuvre technique et humaine. Les opérations (*manufacturing*) ne sont d'ores et déjà plus considérées comme le *dirty job* ; il est acquis que la richesse se construit à l'atelier (*shop floor*). Ainsi, le toyotisme, également appelé « fabrication au plus juste » ou encore *lean manufacturing*, est là pour le prouver : ce système de production a permis à la société Toyota de créer un empire industriel dans l'automobile et de surpasser les Américains chez eux.

La **révolution numérique**, depuis quelques années, a induit un changement radical (*disruption*) tant au niveau de la société qu'au niveau des entreprises, à la fois sur le plan managérial et sur le plan productif. Elle a été rendue possible par la puissance accrue des ordinateurs (loi de Moore), par la multiplication des capteurs, leur miniaturisation, leur faible coût et le développement des **algorithmes**. La notion d'intelligence artificielle (IA), qui regroupe un ensemble d'**applications informatiques** et d'**algorithmes** basés sur le traitement et l'exploitation des mégadonnées (Big Data), témoigne à elle seule de cette révolution industrielle en cours. L'IA modifie nos vies, nos métiers, notre façon de nous déplacer, de nous soigner bien souvent, sans que nous en soyons conscients. Ce terme envahit livres, articles, discours, programmes de recherche privés et gouvernementaux. Les smartphones et les tablettes, qui n'ont qu'une dizaine d'années, sont l'un des supports essentiels de cette révolution. Qui pourrait aujourd'hui s'en passer ?

En plus de l'IA, la révolution numérique a apporté avec elle un certain nombre d'**outils numériques** à la base du concept d'**usine du futur**, né en Allemagne sous la dénomination « usine 4.0 ». L'usine du futur combine monde virtuel et monde réel. Parmi ces outils, citons l'IoT (*Internet of Things*) – tout est connecté tout est connectable –, la réalité virtuelle, la réalité augmentée, les jumeaux numériques, la fabrication additive (imprimante 3D), etc. Le monde du travail est affecté en profondeur par la robotique et la cobotique. Il faut s'attendre à l'éclosion d'une industrie où les tâches répétitives, fatigantes, salissantes, voire dangereuses, seront éliminées. L'opérateur sera plus un superviseur qu'un exécutant.

À cela s'ajoute le fait que le concept de développement durable, base de la RSE, est aujourd'hui acquis, incluant le besoin de métriques (*metrics*). L'industrie va vers une économie circulaire, décarbonée, sans doute décentralisée. Les bio-industries n'échappent pas à cette évolution avec le développement de la biologie synthétique, remarquable futur outil technologique, mais sujet à controverse sur le plan de l'éthique.

Dans ce contexte mouvant, il est dès lors difficile d'appréhender ce que sera l'évolution de l'emploi ; des fonctions nobles se créent (*Data Officer*), alors que les tâches subalternes sont en voie de disparition.

Allons-nous vers une **civilisation des algorithmes** ? Leur opacité fait craindre l'avènement d'une « Black Box Society » où la liberté individuelle serait en danger. Tout se sait, tout peut se savoir ! Nos sociétés déjà basées sur la science, la technologie et le savoir vont devenir de plus en plus connectées et sans doute plus complexes et plus vulnérables.

Les GAFAs (Google, Apple, Facebook et Amazon), entreprises numériques d'Internet parmi les plus puissantes du monde, effraient déjà par leur pouvoir capitalistique, leur supranationalité et leur vitesse de déploiement. Dans cette course technologique mondiale où tout s'accélère, la Chine est désormais entrée en lice et fait face aux États-Unis.

C'est à ces réflexions qu'invite cet ouvrage. Il se veut vivant et abordable par tous ; il renvoie à des vidéos illustratives et présente des exemples concrets proposés par des personnalités de premier plan sous la forme d'encadrés. Leur liste est donnée en fin de chaque volume.

### Vidéos

Pour faciliter l'accès aux ressources illustrant cet ouvrage, en particulier les vidéos, un site est à votre disposition en suivant ce lien :

<https://frama.link/livreIndustriesProcedes>



Les liens et vidéos sont classés par volume et par chapitre (*via* le menu à gauche), dans l'ordre d'apparition dans l'ouvrage.

## Les chapitres

### ***Volume 1. Entreprise durable, bases managériales et scientifiques***

#### ***Chapitre 1. Des industries, des entreprises et des hommes (Jean-Pierre Dal Pont)***

Ce premier chapitre est consacré à l'industrie et aux entreprises qui en dépendent. Il se focalise sur les industries de procédé, tout en soulignant ce qui les différencie

des industries manufacturières et de service. Sont abordés les thèmes concernant leur constitution, leur stratégie, leur fonctionnement, leur gouvernance.

## *Chapitre 2. Notre habitat la Terre : des produits par millions, la nécessité d'une prise de conscience (Jean-Pierre Dal Pont et Michel Royer)*

Consacré à la relation entre les produits et l'environnement, ce chapitre amorce une réflexion sur notre mode de vie. Notre habitat la Terre est un espace fini dont les cycles complexes dépendent des activités anthropiques : on peut citer par exemple la chimie atmosphérique et la problématique de l'ozone. Les systèmes vitaux de l'eau, de la nourriture, de l'énergie et du climat sont désignés sous le terme de « nexus » car ils sont interdépendants. Les produits, dont la quantité croît avec l'explosion démographique, doivent être écoconçus à l'aide de l'ACV (analyse du cycle de vie) et d'études de toxico-éco-toxico et de traçabilité, et se tourner vers des matières premières biosourcées. L'économie circulaire doit prévaloir sur une économie linéaire qui consiste à extraire, produire, consommer, jeter.

## *Chapitre 3. Conception de produits chimiques (Willi Meier)*

Le chapitre 3 est dédié à la conception des produits et à leur formulation. Un produit doit être conçu pour répondre aux besoins des clients. Dans des marchés désormais saturés, les entreprises se tournent vers des produits fonctionnalisés souvent complexes. Le Post-it en est un exemple vivant : au départ, une colle qui colle mal ! Qui pourrait aujourd'hui s'en passer ? De plus en plus basés sur des MP bio-sourcées et les biotechnologies, les produits utilisent des additifs, des ingrédients tels que l'amidon et la gélatine. C'est le cas des médicaments qui peuvent être aussi encapsulés avec des alginates pour atteindre la bonne cible au moment voulu. L'histoire de l'Aspirine®, synthétisée pour la première fois par Bayer en 1897, est remarquable. Sa survie est due en partie à des formulations sophistiquées. Le café offre un autre exemple de développement de formulations buvables. La formulation de produits « intelligents » respectueux de l'environnement dans le domaine des textiles ou des engrais, par exemple, relève d'une science pleine d'avenir.

## *Chapitre 4. Génie des procédés : introduction et fondamentaux (Marie Debacq, Alain Gaunand et Céline Houriez)*

Le génie des procédés, bien qu'omniprésent tout autour de nous, est pour ainsi dire inconnu du grand public. Le début de ce chapitre s'attache donc à donner quelques définitions et repères historiques à propos de cette jeune science appliquée. Les fondamentaux du génie des procédés sont ensuite présentés : en commençant par la thermodynamique, puis les transferts et enfin la cinétique chimique et la catalyse. La dernière partie du chapitre présente la démarche « système-bilans-performance » pour la conception des procédés par le biais de deux exemples simples. Un encadré présente le tout premier niveau de calcul sur les procédés, à savoir les bilans de matière.

### ***Chapitre 5. Génie des procédés : opérations unitaires (Marie Debacq)***

Le concept d'opération unitaire a permis de rassembler par grandes catégories les innombrables équipements utilisés par les industries de procédés. Ces opérations unitaires sont nombreuses et il ne s'agit pas d'en donner ici une présentation exhaustive. Ce chapitre en balaye donc quelques-unes, choisies parce que particulièrement emblématiques ou bien représentatives de tel ou tel type d'opération. Ainsi sont successivement présentés : la distillation, la plus importante opération de séparation et aussi certainement la plus mature scientifiquement ; quelques opérations de séparation mécanique fluide/solide, très répandues industriellement mais encore aujourd'hui relativement empiriques ; l'agitation, comme symbole de l'importance de l'hydrodynamique (c'est-à-dire l'étude des mouvements des fluides) en génie des procédés ; les échangeurs thermiques, principaux représentants des opérations de transferts (thermiques non couplés) ; et enfin les réacteurs, qui sont au cœur des procédés et responsables de la transformation de la matière à l'échelle des molécules elles-mêmes.

## ***Volume 2. Management industriel et révolution numérique***

### ***Chapitre 1. Les bio-industries à l'heure de la transition numérique : importance et nouvelles avancées (Philippe Jacques)***

La révolution numérique est en train de modifier profondément le métier des ingénieurs engagés dans les bio-industries. Ce chapitre décrit les principales étapes de développement d'un produit d'origine microbienne et comment les approches liées à la bio-informatique, la biologie synthétique, la biologie systémique et la microfluidique vont permettre d'amplifier le développement de ce secteur économique en pleine croissance.

### ***Chapitre 2. Production d'hydrogène par vaporeformage (Marie Basin, Diana Tudorache, Matthieu Flin, Raphaël Faure et Philippe Arpentinier)***

Ce chapitre présente le procédé de production d'hydrogène le plus répandu dans le monde : le reformage à la vapeur de gaz naturel. Toutes les briques technologiques de ce procédé sont décrites ainsi que les problématiques d'opération industrielle de ces unités. Les évolutions en cours et futures, notamment celles visant à minimiser les émissions de dioxyde de carbone, sont également évoquées.

### ***Chapitre 3. L'industrialisation : de la recherche au produit fini (Jean-Pierre Dal Pont)***

Le procédé comprend l'ensemble des technologies que l'atelier et l'usine vont mettre en œuvre pour fabriquer un produit ou un ensemble de produits. Très généralement, c'est une réaction suivie d'une purification : un médicament ou un produit pour la protection des plantes, molécules souvent complexes, sont le résultat de plusieurs

réactions et plusieurs séparations ou purifications appelées « opérations unitaires » décrites par ailleurs.

Ce chapitre a pour but de décrire le processus d'industrialisation, qui partant de recherches, va définir l'outil de production. En fin de chapitre, deux encadrés décrivent la construction modulaire de plus en plus recherchée et les contraintes et avantages d'une plateforme multi-atelier.

#### *Chapitre 4. Les opérations (Jean-Pierre Dal Pont)*

Les opérations, ou production (*manufacturing*), désignent la mise en œuvre des outils industriels (usine, atelier) (*plant* aux États-Unis, *factories* au Royaume-Uni). C'est une fonction essentielle des industries de procédés, source de leurs produits et des services afférents, et, partant, de leur profit.

Ce chapitre étudie l'outil de production, ses flux (financiers, d'information, de matières) et les outils informatiques de plus en plus élaborés qui permettent de les gérer, les ERP (*Enterprise Resource Planning*). Il donne également les bases du calcul du prix de revient des produits et des marges. Enfin, le management du changement fait l'objet d'une réflexion particulière : durer, c'est aussi changer.

#### *Chapitre 5. L'entreprise et l'usine du futur à l'ère de la transition numérique (Jean-Pierre Dal Pont)*

Le chapitre 5 rappelle les révolutions industrielles qui se sont succédé depuis l'invention de la vapeur, source d'énergie au début du XVIII<sup>e</sup> siècle, jusqu'à nos jours. Il analyse leur impact sur la société et sur l'entreprise capitalistique telle que nous la connaissons aujourd'hui. L'accent est mis sur l'informatique qui prend son essor après la Seconde Guerre mondiale. L'apparition d'Internet vers 1990, celle du smartphone vers l'an 2000 et les débuts de l'intelligence artificielle vont initier la révolution numérique dont nous voyons déjà l'impact inouï sur la société et l'industrie. De nombreux encadrés donnent des exemples d'utilisation de l'IA dans des domaines aussi variés que la voiture autonome, l'exploration sous-marine, la robotique et le management industriel.

#### *Chapitre 6. Et demain... (Jean-Pierre Dal Pont)*

Ce dernier chapitre est une réflexion sur la révolution numérique telle qu'elle est perçue aujourd'hui et plus particulièrement sur l'intelligence artificielle qui en est le porte-drapeau médiatique. L'IA affecte de plus en plus la ville qui veut devenir *smart*. La filière eau est prise comme exemple d'activité économique dont le numérique modifie les procédés, la gestion des réseaux de distribution et les métiers.

Si les diverses applications de cette technologie naissante peuvent faire espérer de nombreux progrès et améliorations, l'utilisation de l'IA soulève bien des questions.

Le fonctionnement même de l'entreprise industrielle en est bouleversé. Le teslisme, synonyme entre autres de l'« hybridation » des systèmes informatiques, va-t-il supplanter le fordisme ? Le robot qui assiste l'opérateur n'est-il pas une menace pour son emploi ? Le citoyen quant à lui se pose des questions de l'immixtion des GAFAs dans sa vie privée et les gouvernements sur leur supranationalité. Le « tout connecté » fait craindre pour la fragilité des systèmes administratifs et industriels tandis que la cybercriminalité est une menace omniprésente. La question fondamentale est de savoir si l'homme est bien au cœur du dispositif et... pour combien de temps.

Dans la période de bouleversements actuelle où « la seule certitude est l'incertitude », peut-être faut-il s'approprier l'une des pensées du grand manager du XX<sup>e</sup> siècle Peter Drucker : « La meilleure façon de prévoir l'avenir, c'est de le créer. » L'une des ambitions de cet ouvrage est d'aider le lectorat dans cette recherche, ou tout du moins, de tenter d'aiguiser sa curiosité.